

**UFRRJ**  
**INSTITUTO DE FLORESTAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**CIÊNCIAS AMBIENTAIS E FLORESTAIS**

**DISSERTAÇÃO**

**O uso de *Tillandsia usneoides* (L.) L. como  
biomonitor da poluição veicular atmosférica ao  
longo da Rodovia Santos Dumont - Trecho da  
BR-116/RJ**

**Suélem Costa Moreira Soares**

**2023**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO**  
**INSTITUTO DE FLORESTAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS**  
**AMBIENTAIS E FLORESTAIS**

**O USO DE *TILLANDSIA USNEOIDES* (L.) L. COMO BIOMONITOR**  
**DA POLUIÇÃO VEICULAR ATMOSFÉRICA AO LONGO DA**  
**RODOVIA SANTOS DUMONT – TRECHO DA BR-116/RJ**

**SUÉLEM COSTA MOREIRA SOARES**

*Sob a Orientação do Professor*  
**André Felipe Nunes de Freitas**

*e Co-orientação do Professor*  
**Rodrigo Ornellas Meire**

Dissertação submetida como  
requisito parcial para obtenção  
do grau de **Mestre em Ciências**  
**Ambientais e Florestais**, no  
Curso de Pós-Graduação em  
Ciências Ambientais e  
Florestais, Área de Concentração  
em Conservação da Natureza

Seropédica, RJ  
Fevereiro de 2024

S676u SOARES, SUÉLEM COSTA MOREIRA, 1993 O uso de  
Tillandsia usneoides (L.) L. como biomonitor da  
poluição veicular atmosférica ao longo da Rodovia  
Santos Dumont - trecho da BR-116/RJ / SUÉLEM COSTA  
MOREIRA SOARES. - NOVA IGUAÇU, 2024.  
60 f.: il.

Orientador: André Felipe Nunes de Freitas.  
Coorientador: Rodrigo Ornellas Meire.  
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal  
Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós Graduação em  
Ciências Ambientais e Florestais , 2024.

1. Poluição Atmosférica de Origem Veicular. 2.  
Material Particulado. 3. Metais Pesados. 4.  
Tillandsia usnoides. 5. Rodovia Presidente Dutra. I.  
Freitas, André Felipe Nunes de, 1972-, orient. II.  
Meire, Rodrigo Ornellas, 1977-, coorient. III  
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.  
Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais e  
Florestais . IV. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE FLORESTAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E  
FLORESTAIS

SUÉLEM COSTA MOREIRA SOARES

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Conservação da Natureza.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 28/02/2024

---

André Felipe Nunes de Freitas. Dr. UFRRJ (Orientador)

---

Cesar Rogério Leal do Amaral. Dr. UERJ

---

Antonio Azeredo. Dr. UFRJ



**TERMO N° 135/2025 - PPGCAF (12.28.01.00.00.00.27)**

**(N° do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)**

*(Assinado digitalmente em 28/02/2025 10:58 )*

**ANDRE FELIPPE NUNES DE FREITAS**

PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR

DeptCAmb (12.28.01.00.00.00.29)

###817#0

*(Assinado digitalmente em 28/02/2025 09:29 )*

**ANTONIO AZEREDO**

ASSINANTE EXTERNO

CPF: ###.###.087-## Matrícula:

*(Assinado digitalmente em 01/03/2025 13:51 )*

**CESAR ROGERIO LEAL DO AMARAL**

ASSINANTE EXTERNO CPF:

###.###.987-##

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/documentos/> informando seu número: **135**, ano: **2025**, tipo: **TERMO**, data de emissão: **28/02/2025** e o código de verificação: **53c2bb3a02**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por ser essencial em minha vida, autor do meu destino, meu guia, socorro presente na hora da angústia, ao meu pai que é meu maior exemplo de vida, fé e conquista, mostrando sempre que a melhor maneira de crescer na vida é através dos estudos, assim como toda minha família, que sempre foi e será minha rede de apoio, amor e carinho.

Isaías 41:20

## AGRADECIMENTOS

Sou grata primeiramente a Deus, que me permitiu ingressar, permanecer e concluir essa formação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. André Felipe Nunes de Freitas, pelo apoio, parceria e amizade prestada durante todo o desenvolvimento deste projeto de dissertação.

Ao Prof. Dr. Rodrigo Ornellas Meire, meu co-orientador, que há muito tempo acompanha, incentiva e auxilia meu desenvolvimento acadêmico e profissional, assim como, por toda amizade, apoio intelectual, financeiro e emocional. Com toda certeza, um dos meus maiores exemplos dentro da área científica.

Ao Prof. Dr. Antonio Azeredo, por toda ajuda com questões direcionadas à Microscopia Eletrônica de Varredura.

Ao meu pai Ananias, minha mãe Alice e minha madrastra Kátia, minha tia Cristina, minhas irmãs Keyse e Kelly, que me apoiaram e estiveram ao meu lado em todo esse período.

A psicóloga Cíntia Barros, que foi meu ombro amigo e apoio emocional durante a evolução do mestrado.

As minhas amigas Isabella, Mayara, Andreza, por todo apoio e socorro em dias obscuros.

A minha amiga Larissa Legora, pelo exemplo de vida, fé e coragem em momentos difíceis. Assim como por todas as vezes que me chamou para pintar desenhos em sua casa. Ali, eu também estava sendo curada internamente.

Ao Prof. Dr. Nilson Tavares, amigo e conselheiro durante toda a minha trajetória até aqui.

Ao meu amigo Heron Casati, por toda parceria, representação discente e auxílio com questões relacionadas ao programa da pós-graduação.

A todos os integrantes do Laboratório de Ecologia Florestal e Biologia Vegetal – LEF, pela receptividade e ensinamentos.

A todos os integrantes do Laboratório de Radioisótopos Eduardo Penna Franca – LREPF, que hoje se tornaram a minha família científica, em especial aos meus amigos e companheiros de trabalho: Gabriel Carvalho, no auxílio com a estatística dos dados; Adan Lino e Ricardo (mais conhecido como Ricardinho) no auxílio com o equipamento de Absorção Atômica.

Ao coordenador Brunno Verçosa, por ter me concedido a oportunidade de desenvolver parte do meu projeto no Núcleo Multidisciplinar de Pesquisa em Biologia (NUMPEX-Bio) UFRJ – Campus Duque de Caxias.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## RESUMO

SOARES, Suélem Costa Moreira. **O uso de *Tillandsia usneoides* (L.) L. como biomonitor da poluição veicular atmosférica ao longo da Rodovia Santos Dumont - Trecho da BR-116/RJ.** 2023. 60p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

As rodovias são redes vastas, com longa extensão de terra pavimentada que podem impactar negativamente o meio ambiente, principalmente quando projetadas próximo a Unidades de Conservação Federal. Portanto, este estudo teve por objetivo estudar o impacto do tráfego da BR-116 na distribuição da poluição atmosférica dentro do Parque Nacional da Serra dos Órgãos. Neste estudo, as amostras da bromélia *Tillandsia usneoides* L. (L.) foram transplantadas e expostas por 45 dias ao ar livre em 4 áreas de domínio do Parque Nacional da Serra dos Órgãos: Guapimirim, Vale do Garrafão, Santuário Ecológico e Sede Teresópolis. A determinação de ferro (Fe), Zinco (Zn), Manganês (Mn) e Cobre (Cu) foram realizadas por Espectrometria de absorção atômica, enquanto a quantificação do material particulado (MP2.5, MP10 e MP> 10) foi realizada por microscopia eletrônica de varredura. O Fe se destacou como o elemento com concentração mais abundante em todas as áreas de estudo, enquanto o índice de material particulado total foi mais abundante na região de Guapimirim. Os pontos amostrais dispostos na borda da rodovia apresentaram maior aporte de metais pesados e material particulado quando comparados com as demais amostras, devido à maior proximidade com a rodovia. Logo, espera-se que ações e políticas públicas para mitigar as concentrações de MPs, e diversos outros poluentes que estão presentes em sua composição (ex: hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, contaminantes de origem secundária, entre outros), devam concentrar-se na redução das emissões veiculares e na promoção de combustíveis mais limpos, trazendo como incentivo o desenvolvimento de sistemas de transporte baseados em fontes de energia mais limpas.

**Palavras-chave:** Poluição atmosférica. Material Particulado. Rodovia Presidente Dutra.



## ABSTRACT

SOARES, Suélem Costa Moreira. **The use of *Tillandsia usneoides* (L.) L. as a biomonitor of atmospheric vehicular pollution along the Santos Dumont highway – Excerpt of BR-116/RJ.** 2023. 60p. Dissertation (Master in Environmental and Forestry Sciences). Institute of Forests, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2023.

The highways are vast networks, with a long length of paved land that can negatively impact the environment, especially when projected close to federal conservation units. Therefore, this study aimed to study the impact of BR-116 traffic on the distribution of air pollution within the Serra dos Órgãos National Park. In this study, samples from Bromélia *Tillandsia Usneoids* L. (L.) were transplanted and exposed for 45 days outdoors at 4 Serra dos Órgãos National Park sites: Guapimirim, Vale do Garrafão, Ecological Sanctuary and Teresópolis Headquarters. The determination of iron (Fe), zinc (Zn), manganese (Mn) and copper (Cu) were investigated by atomic absorption spectrometry, while quantification of particulate material (MP2.5, MP10 and MP> 10) was performed by Electronic scanning microscope device. The Fe stood out as the most abundant concentration element in all areas of study, while the total particulate material index was more abundant in the Guapimirim region, as well as Fe. The sample points arranged on the edge of the highway have greater contribution of heavy metals and particulate material compared to other samples, due to the higher proximity to the highway. Therefore, it is expected that public actions and policies to mitigate the concentrations of MPs, and several other pollutants that are present in their composition (e.g. polycyclic aromatic hydrocarbons, contaminants of secondary origin, among others), should focus on reducing vehicle emissions and the promotion of cleaner fuels, encouraging the development of transport systems based on cleaner energy sources

**Keywords:** air pollution. Particulate material. Presidente Dutra Highway.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	10
1.1 Objetivos	16
1.1.1 Objetivo geral	16
1.1.2 Objetivos específicos	16
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b>	
2.1. Exposição a poluição do ar e os riscos à saúde.	17
2.1.1 Poluição veicular por metais pesados e material particulado.	19
2.1.2 A importância da <i>Tillandsia usneoides</i> (L.) L. como bioindicador da poluição atmosférica.	22
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b>	25
3.1 Área de estudo	25
3.2 Coleta das amostras	29
3.3 Tratamento e preparo das amostras	30
3.4 Translocação das amostras na área de estudo e coleta do Material Particulado	31
3.5 Mensuração da abertura do dossel florestal	33
3.6 Digestão ácida e análise dos metais pesados	34
3.7 Caracterização química do Material Particulado	35
3.8 Análise de dados	37
<b>4. RESULTADOS</b>	38
4.1 Metais pesados ou elementos traço	38
4.2 Material Particulado	44
<b>5. DISCUSSÃO</b>	56
5.1 Elementos – traço	56
5.2 Material Particulado	59
<b>6. CONCLUSÃO</b>	62
<b>REFERÊNCIAS</b>	64

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento do uso de veículos automotores no Brasil e no mundo tem sido uma tendência notável nos dois últimos séculos. Em resposta ao crescimento populacional e urbanização acelerada, observamos uma inevitável expansão da frota de transportes. Estimativas globais indicam que o número de veículos em circulação atingiu cifras expressivas, com uma expansão contínua principalmente em território brasileiro, que passou a ter só no ano de 2023 um total de 119.227.657 veículos automotores, apresentando um crescimento na frota de 24,93% desde os anos 2000 (BRASIL, 2024). Ainda no contexto brasileiro, o acesso facilitado ao crédito e melhorias econômicas contribuíram para um aumento substancial na posse de veículos individuais, gerando desafios relacionados ao tráfego, congestionamentos e emissões de poluentes. Assim, as fontes móveis se destacam como um dos maiores contribuintes de uma série de poluentes atmosféricos, tais como monóxido e dióxido de carbono, óxidos de nitrogênio, compostos orgânicos voláteis (COVs), incluindo compostos aromáticos voláteis e micropartículas com diâmetros entre  $\leq 2,5$  (MP 2,5) e  $\leq 10 \mu\text{m}$  (MP 10), esta última em especial associadas a uma série de agravos ambientais e de saúde pública (CETESB, 2022; ARBEX *et al.*, 2012).

Desse modo, a indústria de transporte é uma peça fundamental no complexo quebra-cabeça das mudanças climáticas, contribuindo significativamente para as emissões globais de uma variedade de poluentes atmosféricos. Conforme apontado no Relatório de Transporte e Ambiente da Agência Europeia do Ambiente - AEA (2022, p. 5), os meios de transporte são responsáveis por um quarto das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) na União Europeia, sendo o transporte rodoviário o principal vilão, contribuindo com 72% em 2019. No Brasil esse número também é alarmante, já que no ano de 2020 o setor de transporte foi responsável por aproximadamente 13% das emissões nacionais de GEE, ficando atrás no ranking apenas do setor agrícola, com 35%, e da mudança no uso da terra (27%). Nos últimos anos, inúmeros estudos científicos têm fornecido uma visão mais detalhada sobre a natureza e o impacto dessas emissões, ampliando nossa compreensão dos desafios ambientais associados ao setor.

A título de exemplo, o monóxido de carbono (CO) e o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) são dois poluentes críticos emitidos pela indústria de transportes. O CO, resultado da combustão incompleta de combustíveis fósseis, contribui para a poluição do ar e, em altas concentrações, pode representar riscos à saúde humana. O CO<sub>2</sub>, por sua vez, é o principal gás do efeito estufa, desempenhando um papel central nas mudanças climáticas. Estudos como o de Zhang *et al.* (2019) destacam a relação direta entre as emissões de CO<sub>2</sub> provenientes do setor de transporte e o aumento das concentrações atmosféricas desse gás ao longo do tempo.

Os óxidos de nitrogênio, incluindo o monóxido nitrogênio (NO) e o dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), são liberados durante a combustão a alta temperatura, como nos motores de veículos. Esses compostos não apenas contribuem para a formação de ozônio troposférico, um poluente atmosférico prejudicial, mas também são precursores de partículas finas (MP<sub>2,5</sub>) e grossas (MP<sub>10</sub>). Estudos como o de Lee *et al.* (2020), destacam a importância de abordar as emissões de NO<sub>x</sub> para mitigar não apenas a poluição do ar, mas também os impactos climáticos associados.

As micropartículas finas (MP<sub>2,5</sub>) e grossas (MP<sub>10</sub>) representam uma ameaça direta à saúde respiratória e cardiovascular. Emitidas pelos veículos, essas partículas podem penetrar profundamente nos pulmões, causando danos significativos. Estudos como o de Chen e Hoek.

(2020), ressaltam a correlação entre as emissões veiculares e o aumento da concentração de MP<sub>2,5</sub> e MP<sub>10</sub> atmosférico, ressaltando a necessidade de medidas para reduzir essas partículas prejudiciais. Elas também representam uma classe de poluentes atmosféricos que não apenas têm impactos significativos na saúde humana, mas também desempenham um papel crucial nas mudanças climáticas. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), em seus relatórios abrangentes, tem examinado de perto o papel dessas partículas na dinâmica climática global, proporcionando investigações valiosas para a compreensão desses fenômenos complexos. Além disso, essas partículas são compostas por diferentes substâncias químicas, desempenhando um papel central na alteração da composição atmosférica e, por conseguinte, no sistema climático (SANTOS *et al*, 2022).

Em um primeiro momento, essas partículas atuam como aerossóis atmosféricos, afetando a formação de nuvens e, por conseguinte, os padrões de precipitação. A presença de MP<sub>2,5</sub> e MP<sub>10</sub> também modifica as propriedades ópticas das nuvens, influenciando a quantidade e a distribuição da radiação solar, fazendo com que haja alterações na temperatura e nos padrões climáticos regionais. Todavia, esses efeitos não estão restritos apenas às mudanças climáticas; há uma correlação inequívoca entre as regiões mais afetadas por altas concentrações dessas partículas e aquelas já vulneráveis devido a desigualdades socioeconômicas. O IPCC, ao abordar essas desigualdades, destaca que populações de baixa renda muitas vezes enfrentam uma carga desproporcional de exposição a esses poluentes, agravando disparidades de saúde, conforme apontado no relatório do IPCC (2023).

Além disso, os veículos automotores são hoje responsáveis pela emissão anual de cerca de 1,4 bilhão de toneladas de gases de efeito estufa (GEE), e contribuem significativamente para aumento da temperatura global e mudanças climáticas (FUELECONOMY, 2022). Dentro desse total, aproximadamente 4,6 toneladas estão associadas apenas a emissão de um único poluente em específico, o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (EPA, 2022). De acordo com o relatório anual sobre emissões veiculares da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB, somente no estado de São Paulo, as frotas de veículos automotores disponibilizados no ano de 2020 foram responsáveis por emitir um total de 37 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> para o ar.

Em termos de saúde pública, as consequências do volume de material particulado lançado na atmosfera são graves. Por exemplo, em 2019, a poluição do ar por material particulado MP<sub>2,5</sub> contribuiu para cerca de 307.000 mortes precoces na União Europeia, enquanto o dióxido de nitrogênio, para mais de 40.000 mortes (EEA, 2021). Em termos globais, a Organização Mundial de Saúde – OMS (2021), estima que 7 milhões de pessoas ao redor do mundo morrem precocemente, por ano, somente devido à poluição do ar, o que a torna uma das maiores ameaças ambientais aos seres humanos. Outra estimativa mais recente, também realizada pela OMS (2022), indica que 99% ou quase toda a população mundial vive sob uma realidade de ar poluído, o que tem gerado muitos prejuízos cerebrais, respiratórios e cardiovasculares (OPAS, 2022). No Brasil, Castelhamo *et al* (2022) observaram que ao longo de um período de 16 anos (2003 a 2018), as emissões por MP<sub>2,5</sub> foram responsáveis por mais de 6.500 mortes no país.

Porém, as preocupações não param por aí. No reino vegetal, a poluição por exaustão de automóveis tem o potencial de alterar o conteúdo de proteína, assim como os pigmentos fotossintéticos das angiospermas (VERMA; SINGH, 2006). Além disso, segundo Bezerra, Calado e Cunha (2020), a poluição atmosférica urbana, que tem forte influência da emissão veicular, pode afetar o desenvolvimento foliar de algumas espécies de plantas, como os da família Myrtaceae, especialmente para *Eugenia uniflora* L. (denominada popularmente de pitanga).

A origem dos metais pesados provenientes do transporte veicular é uma outra preocupação ambiental significativa, dada a influência direta desses poluentes na qualidade do ar e do solo. Estes metais desempenham um papel crucial na fabricação de diversos componentes dos veículos, desde o chassi até os sistemas de propulsão. Os metais pesados mais comumente encontrados nos veículos incluem, como, por exemplo, Cádmio (Cd), Cobre (Cu), Chumbo (Pb), Manganês (Mn), Mercúrio (Hg), Níquel (Ni), Zinco (Zn) e algumas ligas metálicas, que também podem ser provenientes do tráfego rodoviário.

O cádmio, encontrado em baterias de veículos e na combustão de pneus, é uma preocupação ambiental adicional. Esse metal pesado é conhecido por sua toxicidade, afetando órgãos como rins e pulmões, e sua presença nos solos pode ter efeitos prejudiciais nas cadeias alimentares. O cobre é fundamental para os sistemas elétricos e eletrônicos dos veículos. Suas propriedades condutoras o tornam essencial na fabricação de fios e componentes elétricos. O chumbo, historicamente utilizado em gasolina como um aditivo antidetonante, tem sido associado a problemas de saúde pública. Embora sua utilização tenha sido drasticamente reduzida devido a regulamentações ambientais, resíduos provenientes de décadas passadas ainda persistem em solos urbanos. A exposição contínua pode resultar em efeitos adversos no desenvolvimento neurológico, especialmente em crianças (EPA, 2021.; HA, 2021).

O manganês é utilizado em ligas de aço, conferindo resistência e durabilidade a componentes cruciais, como motores e sistemas de transmissão. Ele também é essencial na fabricação de partes estruturais e motores de veículos, é um dos principais metais para a indústria automotiva. A exposição humana ao manganês proveniente do transporte veicular é uma preocupação devido aos seus efeitos tóxicos, especialmente quando inalado. Elevadas concentrações atmosféricas de manganês podem resultar em riscos para a saúde, afetando principalmente o sistema nervoso central. Estudos epidemiológicos têm investigado associações entre exposição crônica ao manganês e efeitos neurológicos adversos. Além disso, a deposição de partículas de manganês no solo, provenientes das emissões veiculares, pode ter impactos ambientais. Isso pode afetar a qualidade do solo e, conseqüentemente, influenciar ecossistemas próximos a áreas urbanas com tráfego intenso (WANG; ZANG, 2018.; ATSDR, 2020.; LI *et al.*, 2020).

O níquel, utilizado em ligas metálicas e nos sistemas de escape dos veículos, é um metal que pode ser liberado na forma de partículas finas. A exposição prolongada ao níquel tem sido associada a problemas respiratórios e dermatites, sendo considerado um irritante potencial para a saúde humana (SMITH; BROWN, 2017). Em relação ao zinco, ele está presente em compostos que auxiliam na vulcanização da borracha, conferindo resistência e propriedades antienvelhecimento aos pneus. No entanto, o seu uso pode representar uma preocupação ambiental quando liberado durante a vida útil dos pneus ou em processos de reciclagem (SMITH; *et al.*, 2021).

Diante de todo exposto, monitorar a poluição veicular tornou-se crucial nos dias atuais, tendo em vista que tradicionalmente, equipamentos caros são utilizados para monitorar com precisão a poluição do ar, o uso de organismos bioindicadores passam a oferecer uma ferramenta econômica e valiosa para essa tarefa.

O conceito de bioindicador não segue padrões convencionais; surge como uma temática emergente ligada à avaliação da preservação. O termo "bioindicador" abrange uma espécie ou conjunto delas, que reflete o estado ambiental, seja abiótico ou biótico. Esses indicadores destacam como as alterações no ambiente impactam um habitat, comunidade ou ecossistema, sinalizando se tais mudanças têm efeitos positivos ou negativos (PARMAR *et al.*, 2016). Muitos organismos vivos, como macro invertebrados aquáticos, Aves, plantas terrestres e aquáticas,

anfíbios e micro-organismos do solo, são altamente sensíveis às alterações no meio ambiente, o que podem interferir em funções vitais, como metabolismo, crescimento e reprodução (DAVID, 1989). Segundo Chowdhury *et al* (2023), para que um organismo seja eficaz como um bom indicador, ele deve possuir uma taxonomia e ecologia bem definidas, abranger uma extensa área geográfica, ser especializado em requisitos específicos de habitat, oferecer alertas precoces para mudanças, ser de fácil e econômico levantamento, apresentar respostas congruentes com outras espécies e ter a capacidade de distinguir entre tendências causadas por estresses antropogênicos e aquelas desencadeadas por ciclos naturais.

Entre esses bioindicadores, as plantas emergem como ferramentas eficazes para essa abordagem. Elas não apenas refletem os efeitos nocivos das emissões veiculares, mas também fornecem uma percepção sobre a qualidade do ar. Ao absorverem poluentes atmosféricos, as plantas desempenham um papel duplo: indicam a presença dessas substâncias (também conhecidas como biosentinelas) e, simultaneamente, contribuem para a purificação do ar, promovendo soluções naturais para mitigar seus efeitos prejudiciais. Por isso, a utilização desta classe de organismo como bioindicadores oferecem diversas vantagens. Dentre esses benefícios, as plantas têm a capacidade única de absorver e/ou adsorver poluentes durante seu ciclo de vida. Suas folhas, caules e raízes atuam como interfaces diretas com o ambiente, capturando e acumulando substâncias nocivas presentes no ar, fornecendo uma visão detalhada das mudanças na composição do ar ao longo do tempo, além de desempenhar um papel ativo na purificação do ar.

Outro ponto crucial a destacar, é que diferentes plantas respondem de maneiras distintas à exposição a poluentes atmosféricos. Algumas apresentam alterações visíveis em sua morfologia, como a coloração das folhas ou o tamanho das raízes, outras podem acumular certos poluentes em concentrações detectáveis.

Estudos têm demonstrado que certas espécies vegetais são especialmente sensíveis a determinados poluentes. Por exemplo, líquens são conhecidos por serem altamente sensíveis a níveis elevados de dióxido de enxofre, enquanto algumas árvores, tal como *Bougainvillea spectabilis* e *Azadirachta indica*, são indicadoras confiáveis de ozônio troposférico (OLIVEIRA, 2017.; THOMAS; NAHS, 1973.; JAMAL; *et al*, 2022). Essa seletividade das plantas em relação aos poluentes cria uma abordagem personalizada para o monitoramento, permitindo uma avaliação mais precisa e específica da qualidade do ar em determinadas áreas, sejam elas urbanas, agrícolas ou industriais.

Todos esses poluentes, têm o potencial de contaminar solos florestais localizados próximos de estradas e, com isso, impactar diretamente no crescimento arbóreo e na produtividade das plantas (MALUNGUNJA; THAKUR; DEVI, 2022), colocando em ameaça toda a diversidade local. Esta situação é bastante alarmante se levarmos em consideração as áreas protegidas, os parques nacionais localizados próximos aos grandes centros ou que tem rodovias e estradas de rodagem em seus limites. Esse é o caso do Parque Nacional da Serra dos Órgãos (PARNASO), uma das unidades de conservação mais antigas do país, estabelecido em 1939 no intuito de proteger e preservar parte da biodiversidade do domínio da Mata Atlântica, localizada nos municípios da região serrana fluminense e no mosaico de florestas da Serra do Mar. O PARNASO possui em seus limites rodovias com diferentes intensidades de uso, sendo a de maior volume a Rodovia Santos Dumont ou BR-116. Desta forma, a presente dissertação procura avaliar a influência da emissão de poluentes atmosféricos de origem veicular de um trecho da BR-116 localizado nos limites do PARNASO e o seu impacto na biodiversidade desta UC.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

O objetivo central do estudo é investigar o efeito da Rodovia Santos Dumont na distribuição de poluentes atmosféricos de origem veicular no Parque Nacional da Serra do Órgãos (RJ), utilizando a espécie *Tillandsia usneoides* como biomonitor.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- i. Determinar a concentração dos metais pesados, como, Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Zinco (Zn) nos tecidos vegetais da espécie *T. usneoides*;
- ii. Caracterizar a composição e distribuição espacial do Material Particulado (MP) em *T. usneoides*, quanto ao tamanho aerodinâmico, nos limites e interior do PARNASO;
- iii. Avaliar a influência dos parâmetros: dossel florestal e quilômetro por hora (km/h), na distribuição e deposição dos poluentes no interior do parque.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Exposição a poluição do ar e os riscos à saúde

O conceito de poluição atmosférica está relacionado com a presença ou permanência de substâncias que não fazem parte da composição original do ar, mas que são dispersas para esse compartimento (WHO, 2022), e que são responsáveis por reduzir a qualidade atmosférica e/ou ocasionar alterações prejudiciais ao meio ambiente (como aquecimento global e mudanças climáticas, p.ex.) e à qualidade de vida (como danos respiratórios, dentre outros). Embora muitos dos poluentes atmosféricos sejam quase que exclusivamente de origem antropogênica (p. ex., clorofluorcarbonetos e alguns produtos da combustão de combustíveis fósseis como gasolina e óleo diesel, subprodutos do petróleo), muitas outras substâncias, incluindo ozônio, material particulado (MP), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e monóxido de carbono (CO), também podem resultar de processos de origem natural (BRITO *et al*, 2018).

O governo federal, através da instituição da resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, nº 491 de 19 de novembro de 2018, estabelece que:

Poluente atmosférico é qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar: (i) impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde; (ii) inconveniente ao bem-estar público; (iii) danoso aos materiais, à fauna e flora; (iv) prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade (BRASIL, 1990).

Corroborando com a definição anterior, Cooper e Alley (2011) abordam que qualquer substância presente na atmosfera, em concentrações que ocasione efeitos adversos à saúde humana e ao meio ambiente pode ser definida como um poluente atmosférico.

Dados expressos pela OMS estimam que cerca de 7 milhões de pessoas ao redor do mundo, anualmente, são levadas a óbitos em decorrência da exposição contínua à poluição atmosférica (OPAS, 2022). Um índice significativamente bem expressivo quando se comparado a outros índices de óbitos, como, por exclusivamente doenças não transmissíveis, pneumonia e doenças cardiorrespiratórias.

Por exemplo, a pesquisa conduzida por Xiao Wu, Rachel Nethery e Francesca Dominici da Escola de Saúde Pública de Harvard revelou uma ligação entre a exposição prolongada pela poluição por MP<sub>2,5</sub> atmosférico e um aumento de 11% na taxa de mortalidade por infecção de COVID-19, a cada acréscimo de 1 µg/m<sup>3</sup> (micrograma por metro cúbico) na concentração de poluentes atmosféricos. Revelando que pessoas que residem em regiões com altos índices de poluição atmosférica estão mais suscetíveis a óbito por COVID-19 (XU *et al*, 2020).

Zhao *et al* (2019) constataram que diversos vírus, como o adenovírus e o vírus influenza, têm a capacidade de serem transportados através das micropartículas presentes no ar. A pesquisa também identificou que as partículas em suspensão desempenharam um papel significativo na disseminação da gripe aviária em 2015.

A pesquisa conduzida por Liang *et al* (2020) revelou que indivíduos residentes em áreas com exposição prolongada às emissões de escapamento apresentavam taxas de mortalidade por COVID-19 mais elevadas. De acordo com o trabalho, um aumento de 4,6 ppb na exposição ao NO<sub>2</sub>, predominantemente proveniente do tráfego urbano, resultou em um



aumento de 11% na taxa de letalidade, mesmo após ajustes para outros fatores de risco associados ao óbito pela doença. Zhou *et al* (2019) identificaram aproximadamente 20.000 infecções adicionais por coronavírus e 750 óbitos vinculados à exposição a níveis elevados de MP<sub>2,5</sub> durante os incêndios florestais de 2020 em 92 condados do oeste dos Estados Unidos. Somado a estes cenários, conforme dados da Associação Internacional para o Estudo do Comitê de Detecção Precoce e Triagem do Câncer de Pulmão (2023), a poluição atmosférica ocupa o segundo lugar entre os principais fatores que contribuem para o desenvolvimento do câncer de pulmão. O trabalho declara que existe uma interação sinérgica entre os efeitos da poluição do ar e o tabagismo, agravando o prognóstico do câncer de pulmão.

No decorrer dos anos, é possível observar um conjunto de fatores que vem colaborando potencialmente para a expansão severa da poluição em escala global, que a exemplo temos: processo operacional de indústrias de energia, indústrias de manufatura e construção, processos industriais, combustão residencial e comercial de pequena escala, agricultura, transportes hidroviários, transporte rodoviários (Public Health England, 2018; DUARTE, 2017).

Logo, os danos oriundos da exposição a saúde humana podem ser por efeitos de curto (agudo) a longo prazo (crônico), que estão relacionados ao agravamento de problemas respiratórios, cardiovasculares, alterações fisiológicas (efeito crônico), assim como, o surgimento e agravamento de doenças pulmonares, até mesmo carcinomas (efeito crônico) (MORECINO *et al*, 2020). Em função de toda essa problemática, diferentes estudos que investigam sobre os problemas decorrentes da poluição relatam que danos à saúde e ao meio ambiente já estão ocorrendo e aumentam em um ritmo cada vez mais acelerado (LAUMBATCH; MENG; KIPEN, 2015., VELASCO *et al*, 2020).

Em um estudo realizado com uma ampla classe de contaminantes atmosféricos (material particulado originários de escapamentos industriais e de veículos, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos - HPAs e metais tóxicos), Xue *et al*. (2022) observaram que a exposição humana a esses poluentes pode ocasionar lesões pulmonares e câncer por meio de respostas inflamatórias ao estresse oxidativo, danos ao DNA e modificações epigenéticas. Sob outro enfoque, um estudo realizado no ano de 2012 na cidade de São José dos Campos no estado de São Paulo, mostrou que a exposição por monóxido de carbono (CO) e Ozônio (O<sub>3</sub>) está associado ao aumento de internações hospitalares em crianças (na faixa etária dos 10 anos de idade) com quadro clínico de pneumonia (TUAN; VENÂNCIO; NASCIMENTO, 2020). Estes autores mostram que crianças apresentam maior probabilidade de serem afetadas, devido às condições frágeis do seu sistema imunológico. Da mesma forma, a exposição de mulheres à poluição do ar também está associada a impactos negativos na fertilidade, gravidez, e nas condições fisiológicas de recém-nascidos (WANG; CHAU, 2013., WHO, 2013).

Hoje, a emissão veicular de automotores é classificada como uma das maiores fontes de poluição ocasionadas pela ação humana. Veículos automotores liberam partículas poluentes, assim como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), ozônio (O<sub>3</sub>), hidrocarbonetos (HC), material particulado (MP) e os metais pesados. (Ex. mercúrio e chumbo que estão presentes em combustíveis automotivos e são liberados como subprodutos da queima da gasolina e óleo diesel).

Essas partículas poluentes são geradas, e, por conseguinte, emitidas para o compartimento atmosférico através do sistema de funcionamento dos veículos, como tubos de escape, sistema de lona de freio, detritos de pneus e também, ressuspensão da poeira presente no solo de estradas e rodovias (LAWRENCE; *et al*, 2013).

### **2.1.1 Poluição veicular por metais pesados e material particulado**

Veículos automotores são meios de transportes de grande utilidade na sociedade, que podem fornecer ao ser humano conforto, sensação de liberdade, economia de tempo para locomoção e mais segurança no dia a dia. No entanto, apesar de tantos benefícios, são transportes que podem gerar grandes impactos quando relacionado à esfera ambiental. Carros, motocicletas, ônibus, caminhões e diversos outros automotores estão hoje entre os meios de transportes mais utilizados na nossa sociedade, mas que demandam de muita energia ainda nos pátios das grandes montadoras, durante o seu processo de construção (CEBRAP, 2022).

Antes de cumprir o seu objetivo final, um veículo automotor já inicia o seu impacto no meio ambiente ainda no processo de produção (VICENZO, 2021). Plásticos, aço, alumínio, cobre, magnésio, fibra de carbono, tintas automotivas, são alguns dos principais materiais potencialmente poluidores e que causam um problema gigantesco no ecossistema, sendo pauta contínua de discussão sobre os processos de gestão do meio ambiente e do clima. Entretanto, essa preocupação se torna mais acentuada a partir do momento em que estes contaminantes começam a circular nas grandes estradas e rodovias; uma vez que, veículos de transporte estão entre uma das principais fontes poluidoras e são grande comprometedores dos parâmetros de qualidade do ar no mundo (IEMA, 2019).

A poluição do ar ocasionada por meios de transportes subdivide-se em dois padrões diferenciados de poluição: primária e secundária. O padrão de poluição primária consiste na emissão e dispersão direta do poluente no compartimento atmosférico, o qual fazem parte, óxidos de nitrogênio (NOx), óxidos de enxofre (SOx), monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos voláteis (VOCs), material particulado (MP); enquanto o padrão secundário está relacionado a formação de novos compostos químicos na própria atmosfera, através da reação entre substâncias que já se encontram disponíveis nesse compartimento (SILVA, 2017). Os efeitos desses poluentes são preocupantes, pois no momento que estão disponíveis no ar podem ser prejudiciais aos animais, plantas e seres humanos, especialmente quando referido ao material particulado que está hoje entre os principais poluentes oriundo de veículos a motor.

O material particulado, composto por um complexo de substâncias como: elementos-traço, nitratos, sulfatos, enxofre, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio e enxofre, carbono negro (mais conhecido como “black carbon”, ou seja, carbono oriundo da combustão incompleta de combustíveis fósseis, que são muito utilizados na alimentação de veículos automotores leves e pesados) (PIRACELLI, 2020). Além disso, outras substâncias tóxicas como hidrocarbonetos derivado do petróleo e metais pesados, estão entre os principais poluentes atmosféricos que são emitidos pelo funcionamento veicular. Ele é amplamente encontrado em sistemas de escapamento veicular, principalmente em veículos de alimentação a diesel, que é reconhecido na sociedade como um dos principais sistemas de poluição por MP (ZHANG *et al*, 2023).

Todavia, os metais pesados são substâncias inorgânicas de alto peso atômico, massa atômica igual ou superior 40, número atômico maior que 20 e densidade superior a 5.000 kg.m<sup>3</sup>, que podem ser liberadas por meio de processos naturais no ambiente, através de processos geológicos naturais, gerando grandes aportes de poluição na atmosfera e outros compartimentos bióticos. Isso se dá por meio de um conjunto de ações, como intemperismos geológicos, evaporação de metais do solo, atividades industriais, produções fabris, atividades de mineração, lixiviação metálica por fontes distintas (BRIFA; SINAGRA; BLUNDEL, 2020).

Somado a isto, ações de origem automobilísticas que incluem desde a execução de obras rodoviárias até o funcionamento de veículos leves e pesados em estradas e rodovias nas cidades e grandes centros urbanos também podem intensificar o risco toxicológico de

poluentes mediante ao uso de compostos orgânicos (pesticidas, herbicidas, inseticidas e fertilizantes) em culturas agrícolas (MEHANA *et al.*, 2020).

Alguns metais pesados também são conhecidos na literatura como elementos traço ou oligoelementos, como o zinco (Zn), cobre (Cu), cobalto (Co), manganês (Mn) e ferro (Fe), que são necessários, em quantidades muito pequenas, para as funções metabólicas e fisiológicas do corpo humano, plantas e animais. Eles também são reconhecidos como elementos que ocorrem em concentrações baixas no organismo dos seres vivos, inferiores a 100 microgramas por grama ( $\mu\text{g. g}$ ) ou 100 partes por milhão (PPM) (LIMA; MEURER, 2013).

Dentre a classificação dos metais pesados, os mais abundantes e comumente encontrados na natureza são oito: arsênio (As), cádmio (Cd), cobre (Cu), chumbo (Pb), cromo (Cr), manganês (Mn), níquel (Ni), zinco (Zn). Destes, sete são os mais tóxicos, tanto para o meio ambiente quanto para a espécie humana: As, Cd, Cu, Cr, Pb, mercúrio (Hg) e Zn (RAFFA *et al.*, 2021). É evidente que muitos desses metais em quantidades vestigiais também são de grande importância para o funcionamento e manutenção dos sistemas biológicos dos organismos vivos, por exemplo, o Cu atua no sistema imunológico e age como um agente antibacteriano na morte de macrófagos (FOCARELLI *et al.*, 2022). O Zn é um elemento importante na síntese de ácido desoxirribonucleico (DNA), proteínas, e suporte do sistema imunológico de crianças e adultos, em especial para o período de crescimento infantil e mulheres em período gestacional (INGA.; RINK, 2020; MAHAN *et al.*, 2012). Por sua vez, o Mn é eficiente para a metabolização de carboidratos e proteínas, síntese de colesterol, formação de arginase (proteína envolvida no processo de biossíntese da ureia) e ativação de enzimas responsáveis pelo processo de digestão do organismo (CRAPNELL.; BANKS, 2022). Porém, todos esses e os demais elementos metálicos, quando em níveis elevados, são substâncias potencialmente tóxicas.

### **2.1.2 A importância da *Tillandsia usneoides* (L.) L. como bioindicador da poluição atmosférica**

A *Tillandsia usneoides* L. (L), é uma planta comumente conhecida como "barba-de-velho", que pertence ao gênero *Tillandsia* e faz parte da família Bromeliaceae. Possui ampla distribuição geográfica, colonizando áreas com condições climáticas extremas em regiões da América Central, América do Sul e sul dos Estados Unidos. Essa planta é caracterizada por seu crescimento pendente em longos filetes de folhas estreitas, com coloração esverdeada que se desenvolvem sobre árvores de ambientes desérticos, florestais e montanhosos. Ela apresenta características morfoanatômicas distintas que a tornam uma espécie única dentro do gênero *Tillandsia*. Desse modo, essas características refletem sua adaptação a habitats específicos e seu papel como biomonitor de poluentes atmosféricos (ELIAS.; AOYAMA, 2019).

Do ponto de vista morfológico, a *Tillandsia usneoides* é uma planta epífita, o que significa que ela cresce sobre outras plantas, geralmente em áreas com alta umidade e boa luminosidade. Suas longas correntes de folhas finas conferem a aparência de uma delicada barba, resultando em seu nome popular. Essa morfologia permite que a planta absorva umidade e nutrientes diretamente do ar, uma adaptação crucial para seu ambiente de vida, até mesmo poluentes atmosféricos de diversas origens; por isso, sua capacidade de refletir nos tecidos níveis atmosféricos de elementos tóxicos a torna uma ferramenta valiosa para o biomonitoramento da poluição atmosférica, demonstrando ser indicadores confiáveis de exposição a certos poluentes (WANNAZ.; PIGNATA, 2006).

As *Tillandsias* possuem estruturas celulares especializadas, assim como, tricomas foliares, estômatos, células epidérmicas na superfície da folha, células do mesófilo e células

do feixe vascular no interior da folha, que o permitem a absorção direta e facilitada de umidade e nutrientes (XINGYUE; *et al*, 2021). Os tricomas são apêndices unicelulares ou multicelulares que se estendem da superfície da epiderme das folhas, caules e outras partes da *tillandsia*. Diferentemente de plantas terrestres que obtêm água principalmente do solo, essa espécie epífita depende dos tricomas para capturar a umidade atmosférica e garantir sua sobrevivência em ambientes muitas vezes desprovidos de fontes convencionais de água (SANTOS.; SILVA, 2021. ELIAS.; AOYAMA, 2019. XAVIER, 2020) .

No entanto, os tricomas não são apenas eficientes absorvedores; eles também desempenham um papel crucial na proteção contra herbívoros e patógenos. Sua presença na superfície das folhas cria uma barreira física e, em alguns casos, os tricomas podem secretar substâncias químicas que atuam como repelentes naturais. Um aspecto notável dos tricomas especializados na *Tillandsia usneoides* é sua capacidade de capturar poluentes atmosféricos específicos, como metais pesados e material particulado, incluindo MP 2,5 e MP 10. Essas partículas, presentes na atmosfera devido a atividades humanas e processos naturais, são adsorvidos na superfície e podem ser incorporados nos tecidos da planta. O mecanismo CAM (metabolismo ácido das crassuláceas) complementa essa capacidade, contribuindo para a absorção eficiente de poluentes. Além disso, o mecanismo CAM, também reduz o estresse hídrico, melhorando sua sobrevivência e adaptação a diversas condições ambientais (CALLEGARI, 2021; PELLEGRINI *et al.*, 2014), fato esse primordial para que uma planta possa ser considerada bioindicadora.

Niechayev *et al* (2019) explica de modo detalhado como funciona o mecanismo CAM no processo de agregação de substâncias químicas dispersas na atmosfera.

O metabolismo ácido das crassuláceas (CAM) é uma adaptação fotossintética de concentração de carbono inorgânico, temporalmente controlada, que melhora a eficiência do uso da água (WUE; uma medida da unidade de CO<sub>2</sub> fixada por unidade de água perdida) reprogramando parte ou toda a absorção de CO<sub>2</sub> desde o dia, como é típico das plantas fotossintéticas C<sub>3</sub> e C<sub>4</sub>, até a noite, quando os déficits de pressão de vapor de água ar:folha são menores em comparação com o dia [1]. A fase primária noturna de fixação de carbono pela fosfo *enol* piruvato (PEP) carboxilase (PEPC) usando HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> - como substrato é temporariamente separada da fase secundária diurna de (re) fixação de CO<sub>2</sub> pela ribulose-1, 5-bifosfato carboxilase /oxigenase (RUBISCO). A absorção noturna de carbono pelo PEPC é possibilitada pelo comportamento estomático inverso, no qual os estômatos ficam abertos à noite, mas fechados durante todo ou parte do dia, reduzindo assim a perda de água da planta e aumentando a WUE. As duas fases estão ligadas por intermediários de armazenamento de carbono ácido C<sub>4</sub>, tipicamente ácido málico, que são armazenados no vacúolo e depois descarboxilados durante o dia para fornecer CO<sub>2</sub>, que é (re) fixado por RUBISCO, levando à produção de carboidratos através do C<sub>3</sub> fotossíntese Ciclo de Calvin-Benson. Esta liberação intracelular de CO<sub>2</sub> nas proximidades de RUBISCO eleva as concentrações de CO<sub>2</sub> na folha em até 60 vezes em comparação com os níveis atmosféricos de CO<sub>2</sub>.

Adicionalmente, os tricomas especializados da *T. usneoides* representam uma adaptação extraordinária às exigências ambientais únicas dessa planta epífita. Essas estruturas não apenas garantem sua sobrevivência em ambientes desafiadores, mas também a transformam em uma ferramenta valiosa para o biomonitoramento da poluição atmosférica.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

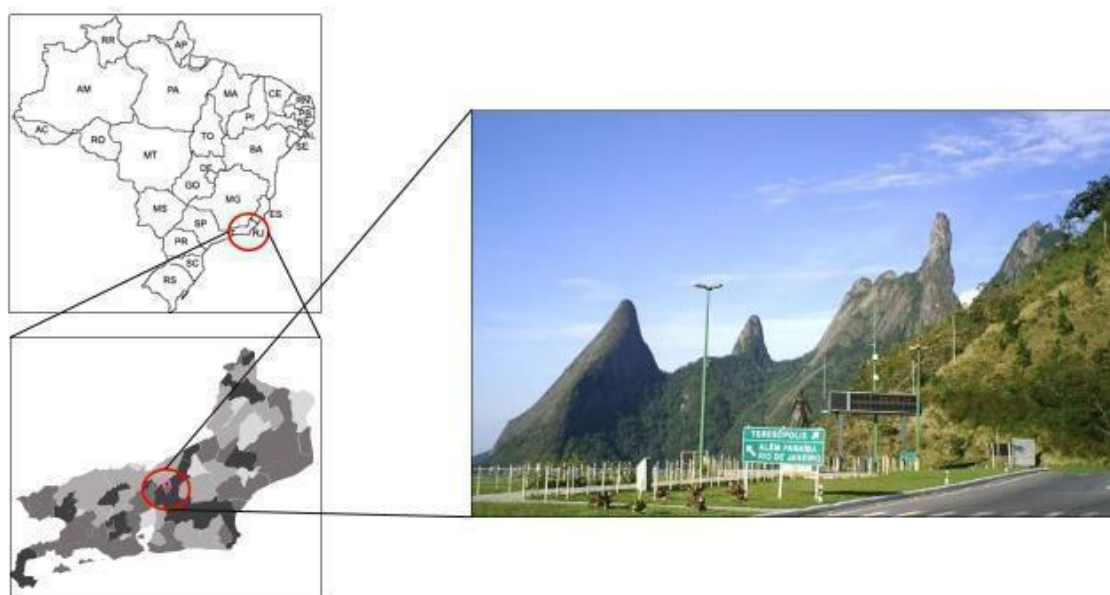
O presente estudo consiste no método de biomonitoramento ativo, uma ferramenta utilizada para avaliar a qualidade do ar em ambientes com diferentes magnitudes de impactos ambientais e que se baseia na análise sistemática das respostas de organismos vivos (da fauna e flora). Os biomonitores alvo são então removidos de uma determinada região caracterizada como controle e introduzidos de modo padronizado no ambiente natural, para avaliação da poluição atmosférica através do processo de bioacumulação de diferentes classes de poluentes que serão determinadas no local de estudo.

Para a realização do estudo, obteve-se, junto ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade – ICMBio, autorização para coleta e transporte de material botânico, além da aplicação da pesquisa dentro da Unidade de Conservação - UC em questão.

#### **3.1 Área de estudo**

Este trabalho foi realizado ao longo da Rodovia Santos Dumont (antiga Rio-Teresópolis - com início no quilômetro 0, em Fortaleza, no estado do Ceará, até o entroncamento com a BR-040, no estado do Rio de Janeiro), trecho da BR-116 RJ/MG (Figura 1) que corta o Parque Nacional da Serra dos Órgãos (PARNASO), entre os municípios de Guapimirim e Teresópolis, ambos localizados no Estado do Rio de Janeiro.

O Parque Nacional da Serra do Órgãos, terceiro parque nacional mais antigo do Brasil, criado em 30 de novembro 1939 por meio do decreto-lei nº 1.822, instituído pelo então presidente da República, Getúlio Vargas, e hoje é reconhecido nacionalmente como Unidade de Conservação Federal de Proteção Integral (RIBEIRO, 2020). O Parque encontra-se localizado no estado do Rio de Janeiro, a 16 km ao norte da Baía de Guanabara, e compreende quatro municípios fluminenses: Petrópolis, Guapimirim, Magé e Teresópolis (Figura 2). O Parque possui uma extensão territorial total de aproximadamente 20.020,75 hectares com áreas de elevação que atingem cerca 2.300 m de altitude (ICMBIO, 2017).



**Figura 1.** Localização do Parque Nacional da Serra dos Órgãos, Estado do Rio de Janeiro, Brasil.

**Fonte:** Adaptado de IBGE (2022)

O clima da região é caracterizado como tropical atlântico, onde apresenta um ambiente atmosférico com índice de umidade consideravelmente elevado, que obtém uma variação de temperatura média anual entre 10°C a 23°C, exceto para áreas de maior altitude, que chega a atingir níveis extremos de até -4°C nas zonas de campos de altitude (regiões do parque com maior altimetria). De fato, esta ocorrência climática explica a sua pluviometria local, que, segundo a classificação climática de Koppen-Geiger, detém uma média de precipitação que varia entre 1.700 a 3.600 mm, com maiores volumes durante os meses de Dezembro a Março, e com inverno, que corresponde aos meses de Abril a Agosto, predominantemente mais seco (SILVA, 2010).

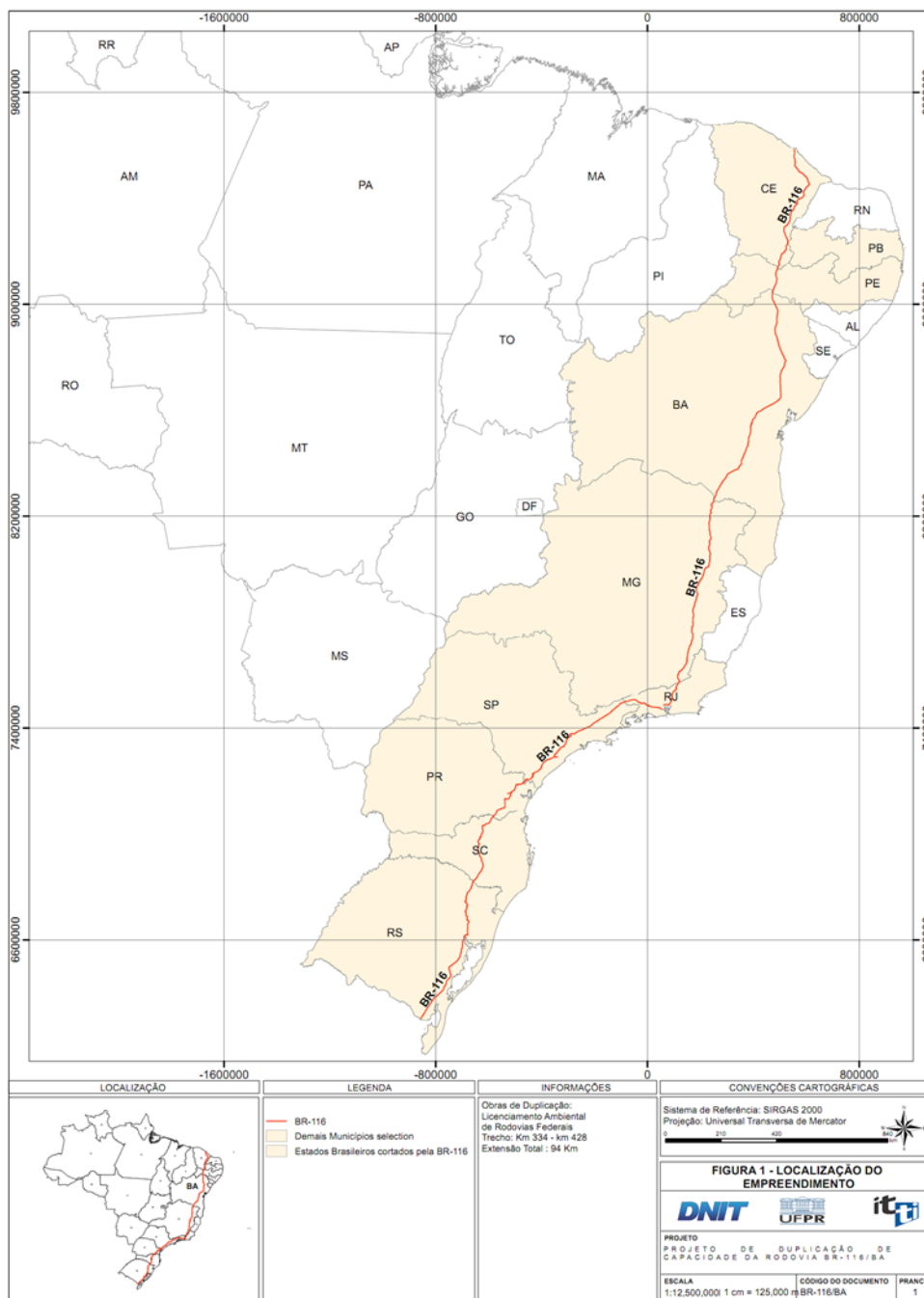
Toda a extensão territorial que pertence ao parque está inserida dentro dos limites da Serra do Mar, com predomínio de uma vegetação altitudinalmente estratificada em quatro formações principais: Floresta Ombrófila Densa Sub-montana, Floresta Ombrófila Montana, Floresta Ombrófila Altomontana e Campos de Altitudes. Em relação ao processo de distribuição de ar, no PARNASO há o predomínio do sistema de massa tropical atlântica, responsável por gerar um ambiente de maior umidade e temperatura em regiões voltadas para a vertente do oceano atlântico (DRUMMOND, 2017).

A principal via de acesso ao parque se dá por intermédio da Rodovia Presidente Dutra, no trecho da Rodovia Santos Dumont (BR-116/RJ-MG), que interliga o as vias de acesso entre Minas Gerais no quilometro zero (km 0) aos municípios do Rio de Janeiro e Teresópolis, onde apresenta um parâmetro de velocidade permitida que varia de 40km/h e 110km/h (CRT, 2021). A Rodovia Presidente Dutra, conhecida como BR-116 (Figura 2), destaca-se como a principal via brasileira, sendo também a mais extensa completamente afastada do país. Estende-se desde Fortaleza (CE) até Jaragão (RS), atravessando dez estados, entre eles: Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Bahia, Pernambuco, Paraíba e

Ceará, conectando centros econômicos e cidades essenciais como Porto Alegre, Curitiba, Rio de Janeiro, Guarulhos, e a cidade de São Paulo, abrangendo cerca de 4.513 km/h (PIZZATO.; SANTOS, 2018) formando uma das principais extensões viárias do Brasil.

Na cidade de Resende, a rodovia se destaca por sua importância estratégica, conectando a região sudeste do país e desempenhando um papel crucial no transporte de mercadorias e passageiros. Nessa área, é possível encontrar empresas e indústrias que dependem da BR- 116 para escoamento da sua produção, consolidando-a como uma via essencial para o desenvolvimento econômico local.

A rodovia, além de sua função logística, desempenha um papel social importante ao conectar comunidades e encurtar distâncias. As pequenas cidades que surgem ao longo do percurso ganham vida com a movimentação trazida pela BR -116, promovendo intercâmbio cultural e comercial entre os estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais. Essa integração contribui para o fortalecimento da identidade regional e para a criação de laços que ultrapassam as fronteiras geográficas.

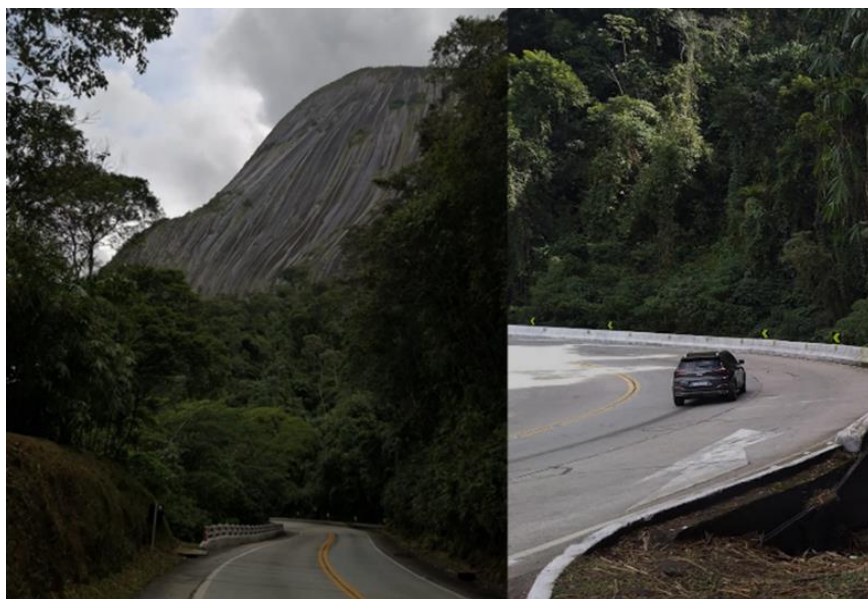


**Figura 2.** Extensão territorial da Rodovia Presidente Dutra.

**Fonte:** <https://itti.org.br/br-116-portal-itti/>

Ao longo do percurso, a BR-116 presenteia os viajantes com uma série de vistas panorâmicas que revelam a riqueza da fauna e flora brasileiras. As serras e vales que a estrada corta proporcionam uma visão privilegiada de ecossistemas únicos, com destaque para a biodiversidade encontrada na região da Serra da Mantiqueira. Parques nacionais e áreas de preservação ambiental são parte integrante da paisagem., proporcionando uma jornada repleta de paisagens deslumbrantes e pitorescas ao longo do bioma da Mata Atlântica (Figura 3).





**Figura 3.** Trecho da estrada BR-116 que interliga os Estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais. As imagens foram feitas no trecho da BR-116 pelo Município de Guapimirim (RJ). Acervo pessoal.

### 3.2 Coleta das amostras

Amostras da planta epífita *Tillandsia usneoides* (L.) L (Bromeliaceae) foram coletadas na sede do PARNASO, nas mediações do centro de visitantes da UC, próximo a piscina de águas naturais, uma área de vegetação nativa com ampla ocorrência da espécie na região serrana do estado do Rio de Janeiro. A coleta ocorreu em agosto de 2022, em uma única expedição. Um grande número de indivíduos formando uma extensa “cortina” da epífita foram retiradas do tronco e ramos de árvores (Figura 4), sendo acondicionadas em sacos plásticos do tipo ziplock hermético, que foram lacrados, identificados e posteriormente transportados para o Laboratório de Radioisótopos Eduardo Penna Franca – LREPF para a realização dos seguintes procedimento de triagem, tratamento e análise.



**Figura 4.** Cortina de *Tillandsia usneoides* L. (L.) na área da piscina natural do PARNASO. Acervo pessoal.

### 3.3 Tratamento e preparo das amostras

As amostras coletadas passaram por uma triagem manual para separação de indivíduos secos e mortos devido à alta exposição solar, assim como de galhos e folhagens de outras plantas e demais resíduos identificados como corpos estranhos às bromélias. Após etapa de seleção dos indivíduos, as bromélias selecionadas foram lavadas com água deionizada para remoção de eventuais partículas aderidas aos tricomas das *Tillandsia*, evitando assim que estas possam causar possíveis interferências nos experimentos. Após a lavagem, as amostras foram secas ao ar ambiente do laboratório por 24h.

Posteriormente, o conjunto de indivíduos processados em laboratório foi subdividido em pequenos 36 sistemas contendo aproximadamente 1 g da planta, que foram acondicionados em amostradores atmosféricos constituídos de uma armadilha de rede, com tela de plástico com dimensões de 8,0 cm de diâmetro x 8,0 cm de altura. Além disso, esse sistema conta também com uma cobertura de placas de acrílico, com 15 cm de diâmetro, que tem por objetivo reduzir o papel da precipitação na lavagem dos indivíduos de *T. usneoides* durante sua exposição no campo (Figura 5). Antes da inclusão das amostras de *T. usneoides*, todos os amostradores foram submetidos a um processo de limpeza em banho de detergente extran neutro Merck (solução a 5%) por 24h, assim como descontaminação em banho de ácido nítrico (solução a 5%) por mais 24h, para evitar a contaminação derivada do processo de fabricação dos materiais e do local onde foram armazenados previamente.

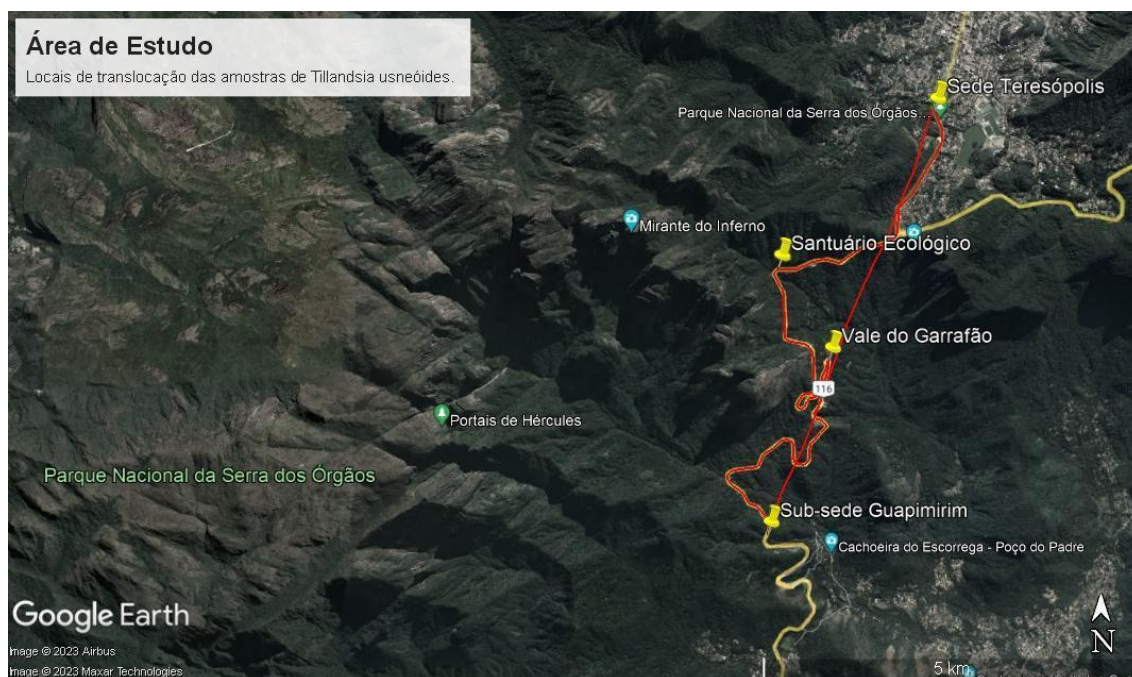


**Figura 5.** A esquerda: imagem da alíquota de *Tillandsia usneoides* L. (L) e à direita: registro do amostrador utilizado neste estudo. Acervo pessoal.

### 3.4 Translocação das amostras na área de estudo e coleta do Material Particulado

Em 15 de agosto de 2022, foi realizada uma única campanha para translocação e fixação dos amostradores para os pontos pré-determinados. Para a alocação dos amostradores, foram selecionadas quatro áreas da estrada, que estão localizadas entre os Km 102 até o Km 89,5: sub-sede Guapimirim do PARNASO, a Trilha do Vale do Garrafão, o Santuário Ecológico e sede Teresópolis do PARNASO (Figura 6; Tabela 1). Em cada uma destas áreas, foram alocados nove amostradores em três distâncias da estrada: a 20 metros da BR-116 (ponto A); a 520 metros (ponto B); e a 1.020 metros (ponto C) (Figura 6; Tabela 1). Em cada distância, foram distribuídos aleatoriamente três amostradores, que foram pendurados por fios de nylon em galhos e troncos de árvores a aproximadamente 2 m de altura do solo, de forma a evitar perturbações humanas e para garantir a captação dos contaminantes atmosféricos pelos amostradores. Após 45 dias de exposição, no período compreendido entre os meses de agosto e setembro, todos os amostradores foram recolhidos e encaminhados ao LREPF para as devidas análises químicas.





**Figura 6.** Localização espacial da distribuição dos pontos de amostragem (amarelo) e possíveis fontes de material particulado

**Fonte:** Google Earth (2023)

**Tabela 1.** Geolocalização dos locais onde foram transplantados amostradores de *Tillandsia usnoides* L. (L). O local representa áreas de estudo de predomínio do parque, onde foram realizados os transplantes: Guapimirim (GUA), Vale do Garrafão (GAR), Santuário Ecológico (SEC), Sede Teresópolis (SED). Ponto A, B e C, correspondem às distâncias da rodovia (A = 15 m; B = 515 m; C = 1.030 m). Os números 01, 02 e 03 estão relacionados ao ponto de coleta por faixa de distância. LAT e LONG correspondem às coordenadas geográficas (latitude e longitude) de cada ponto de transplante. Continua.

LOCAL	PONTO	LAT	LONG
GUA 01	A	-22.494467	-43.0017677
GUA 01	B	-22.4944397	-43.0017128
GUA 01	C	-22.49464526	-43.00136679
GUA 02	A	-22.4938082	-43.0002236
GUA 02	B	-22.493752	-43.0001458
GUA 02	C	-22.4938492	-43.0001685
GUA 03	A	-22.49398069	-42.99899883
GUA 03	B	-22.49418907	-42.99884068
GUA 03	C	-22.49419437	-42.99899492
GAR 01	A	-22.476477	-42.9953182

**Tabela 1.** Continuação

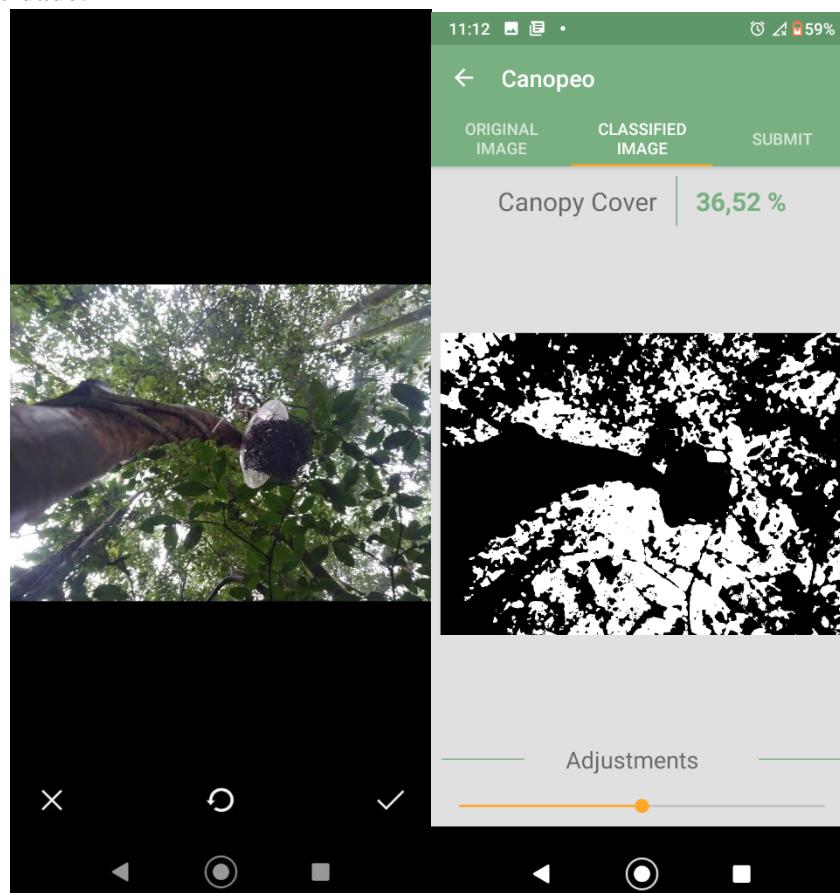
GAR 01	B	-22.4765334	-42.9950938
GAR 01	C	-22.4768181	-42.9950211
GAR 02	A	-22.4746062	-42.9958273
GAR 02	B	-22.4746445	-42.9955935
GAR 02	C	-22.4747819	-42.9954924
GAR 03	A	-22.4748773	-42.9934845
GAR 03	B	-22.474877	-42.9934776
GAR 03	C	-22.4748035	-42.9933146
SEC 01	A	-22.4667738	-43.0028466
SEC 01	B	-22.466743	-43.0029165
SEC 01	C	-22.4667256	-43.0029305
SEC 02	A	-22.46657325	-43.00384561
SEC 02	B	-22.46657349	-43.00384495
SEC 02	C	-22.46657353	-43.0038478
SEC 03	A	-22.46693434	-43.00512362
SEC 03	B	-22.46694955	-43.00523474
SEC 03	C	-22.46699711	-43.00523702
SED 01	A	-22.4484542	-42.9835907
SED 01	B	-22.4489318	-42.9832225
SED 01	C	-22.4483675	-42.9839497
SED 02	A	-22.44868105	-42.98532904
SED 02	B	-22.4487054	-42.9853235
SED 02	C	-22.4487863	-42.9852657
SED 03	A	-22.4489835	-42.9870958
SED 03	B	-22.4491979	-42.9870163
SED 03	C	-22.4486865	-42.9874745

### 3.5 Mensuração da abertura do dossel florestal

A porcentagem de abertura do dossel florestal foi mensurada por meio de fotografia para smartphone utilizando o aplicativo *Canopy Capture* versão 1.0.2 para dispositivos eletrônicos com sistema operacional *Android* ou *IOS*. As fotografias foram realizadas no mesmo dia do transplante dos amostradores a aproximadamente 1,20m de altura do nível do solo, no mesmo local em que as amostras foram posicionadas para o biomonitoramento ativo. No momento da captura da imagem, o aplicativo realiza uma diferença entre a área da estrutura foliar presente na copa e a área aberta livre, ou seja, desconsidera o céu e fornece como resultado final o índice de área Foliar (IAF) que corresponde a abertura do dossel (Figura 7).

O *smartphone* utilizado foi um LG K22 com câmera de 13 megapixels. Para facilitar o processo de obtenção e leitura das fotografias, as capturas das imagens foram realizadas no

intervalo entre 10:30h e 15:00h, em horários com a presença de maior luminosidade e menor índice de nebulosidade.



**Figura 7.** Registro da Cobertura do Dossel Florestal através do aplicativo Canopy Capture com apresentação do índice em porcentagem (%.).

### 3.6 Análise dos metais pesados

Após o período de biomonitoramento ativo, os coletores com *T. usneoides* foram levados para o laboratório para realização das análises laboratoriais por meio de digestão ácida para análise dos metais pesados. Desta forma, aproximadamente 0,5 grama de cada uma das amostras de *T. usneoides* foram pesadas, acondicionadas em becker, direcionadas a um forno Mufla, onde foram submetidas a um processo de calcinação a 312°C por 72h para remoção do carbono orgânico presente nas amostras. Após o arrefecimento, as amostras foram submetidas a um ataque ácido com propósito de realizar a digestão de todas as alíquotas.

Para realizar a análise dos metais por Espectrofotômetro de Absorção Atômica com Chama (EAA-CHAMA), as amostras foram digeridas usando uma adaptação da técnica desenvolvida e validada por Lino *et al.* (2016). Assim, as amostras passaram por um ataque ácido de 5 mL em solução contendo ácido clorídrico (HCl) e ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) concentrado numa proporção de 3:1. As amostras foram aquecidas em placa quente a uma temperatura de 100°C, para devida degradação do material vegetal e solubilização das amostras. Após a completa secagem do extrato, as soluções foram recuperadas com 2,0 mL de ácido clorídrico (HCl 37% v/v, Merck), redirecionadas a placa quente para uma nova secagem e, em seguida,

avolumadas a 20 mL em uma solução de HCl 0,1M e, por fim, armazenadas em tubos falcon para posterior determinação de elementos traço através de um espectrômetro de absorção atômica (EAA-CHAMA, modelo Varian AA 240 FS). Para a leitura de cada elemento químico, foi utilizado um gás de ar acetileno para gerar a chama de excitação atômica dos metais em estudo, enquanto, lâmpadas de cátodo oco com comprimentos de onda específicos para cada elemento traço foram utilizadas para fins de quantificação.

Para fins de garantia de qualidade analítica, foi utilizado um material de referência certificado de folhas de tomate (CRM-Agro C1003a), desenvolvido por meio do Laboratório de Radioisótopos do Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo (LRI/CENA/USP). As soluções para os materiais de referência e brancos analíticos também foram preparadas do mesmo modo que para as amostras de *T. usneoides*.

Todos os produtos químicos utilizados para efetivação das análises foram de alto grau de reagente analítico. Os dados quantitativos deste estudo foram obtidos a partir de curvas de calibração estabelecidas, especificamente para cada elemento analisado, usando padrões de soluções estoque dos metais (1.000 mg.L<sup>-1</sup>) fornecidas pela Merck e Ultra Scientific Analytical Solutions. As diretrizes operacionais dos elementos ferro (Fe), cobre (Cu), Manganês (Mg) e zinco (Zn) foram adequadas de acordo com o recomendado pelo manual de operações do equipamento instituído pela empresa fabricante.

### 3.7 Caracterização química do Material Particulado

A caracterização química do material particulado de tamanho aerodinâmico  $\leq 2,5 \mu\text{m}$ ,  $\leq 10 \mu\text{m}$  e  $> 10 \mu\text{m}$ , foi realizada em colaboração com o Núcleo Multidisciplinar de Pesquisa em Biologia (NUMPEX-Bio) UFRJ – Campus Duque de Caxias. Para a leitura dos MPs foi utilizado um Microscópio Eletrônico de Varredura/Transmissão-varredura - Tescan VEGA 3 LMU (MEV) acoplado à espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS). Para este fim, cerca de 1 cm de cada amostra foi fixada em fitas adesivas de carbono aderidas em *stubs* metálicos para análise no MEV/EDS (Figura 8 - A).

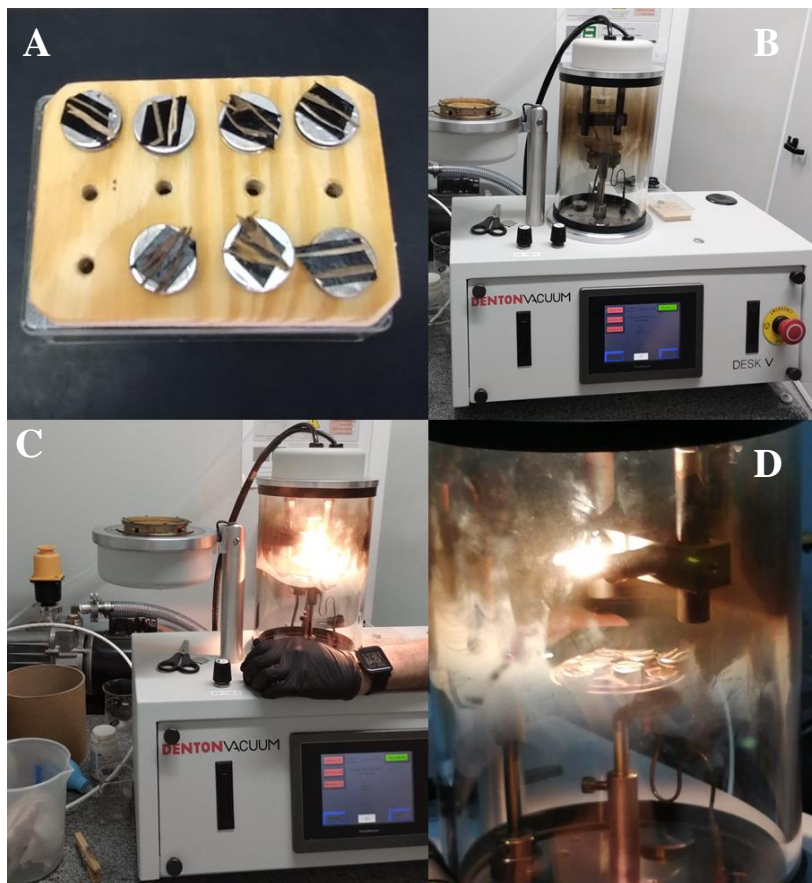
Previamente, as amostras foram recobertas com carbono para devida condução dos elétrons e, por fim, direcionadas para o carrossel do equipamento (Figura 8 – B, C, D). Todas as imagens foram executadas em 5kV de tensão de aceleração de elétron, com três aumentos de campo para visualização da imagem: x500, x1000 e x2000 a uma distância da mesa para amostra de 15 mm, dentro de um sistema de alto vácuo.

Ao final das análises, duas novas amostras de cada transecto foram sujeitas a um procedimento de metalização com ouro, a fim de gerarmos imagens com melhores qualidades de pixels para possível publicação em periódicos científicos.

A quantificação dos MPs em cada imagem, foram realizadas utilizando o Software Image J que é um software de código aberto, mantido pelo National Institutes of Health (NIH), desenvolvido inicialmente para aplicações em microscopia, mas que hoje é amplamente utilizado em diversas áreas, desde as Ciências Biológicas até áreas da Engenharia. Nele, foi possível medir e contar todos os particulados, com tamanho aerodinâmico  $\leq 2,5 \mu\text{m}$ ,  $\leq 10 \mu\text{m}$  e  $> 10 \mu\text{m}$ , disponíveis no fragmento da amostra.

O Image J permite aos pesquisadores e profissionais analisar imagens digitais, extrair dados precisos e realizar medições quantitativas de fenômenos visuais. O software é frequentemente utilizado em estudos biológicos, como análise de células, estruturas celulares

e imagens de microscopia. No entanto, sua aplicabilidade vai além da biologia, sendo empregado em disciplinas como ciência dos materiais, geociências e engenharia.



**Figura 8.** Etapa analítica da aferição do material particulado em *Tillandsia usneoides* L. (L). A) Colagem das amostras em fita de carbono aderidas em stubs metálicos. B) Introdução dos stubs em metalizador. C e D) Estágio de metalização das amostras com carbono. Acervo pessoal.

### 3.8 Análise de dados

As diferenças nas médias das concentrações dos oligoelementos entre as diferentes regiões do estudo foram testadas através do teste de Shapiro-Wilk, realizado no intuito de avaliar a normalidade e a homogeneidade dos dados. Pelo fato dos dados não obedecerem uma distribuição normal e não atenderem as premissas para testes paramétricos, foi utilizado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, enquanto, a correlação de Spearman foi utilizada para investigar as possíveis associações das variáveis quilômetro por hora (Km/h) e cobertura vegetal para com as concentrações.

Para a realização e interpretação dos dados analíticos foi utilizado o software estatístico BioEstat versão 5.3, para a execução dos dados de medidas de tendência central e de dispersão, tais como, média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação e diagramas de *Box-plot*.



## 4. RESULTADOS

### 4.1 Metais pesados

#### A) Diferenças nas concentrações de metais (Fe, Zn, Mn, Cu) nas regiões do PARNASO.

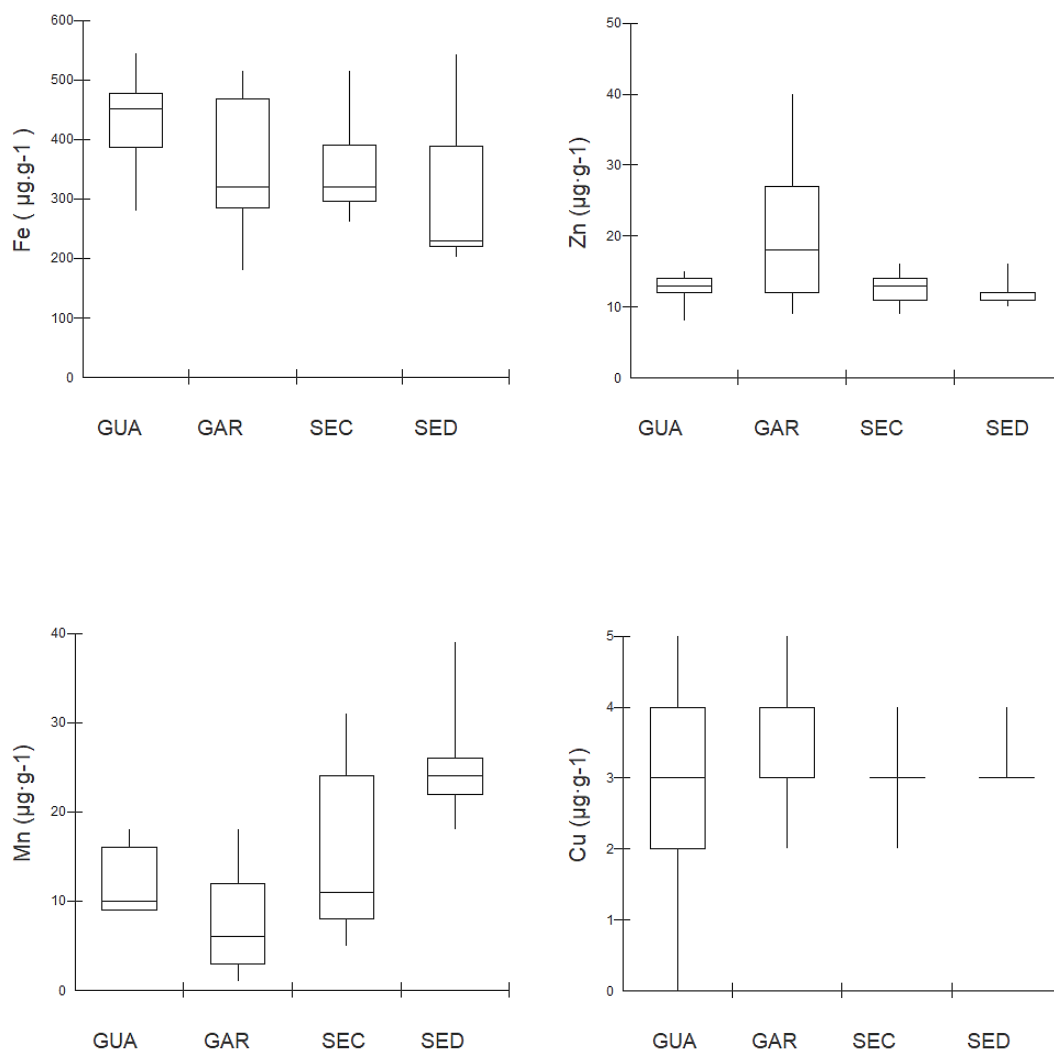
As amostras foram analisadas em duplicatas para verificar a qualidade analítica do material. Os coeficientes de variação entre 1 – 20% e valores de brancos analíticos de 0,09 a 0,12 µg/L, foram utilizados a cada bateria das amostras com objetivo de assegurar o controle de qualidade experimental, a fim de permitir tornar visível caso exista ou não alguma interferência no procedimento. O percentual de recuperação do material de referência variou de. Todas as concentrações dos oligoelementos nas amostras foram expressas em µg.g<sup>-1</sup> de massa seca. A precisão e exatidão do método do estudo em questão foram avaliados pelo uso de material certificado de referência CRM-Agro C1003a, a fim de se avaliar nosso desempenho analítico. Como resultado da recuperação, as amostras certificadas variaram entre 86,2 % e 120,1 %, considerado dentro da faixa aceitável de análise (80-120%). Todos os dados relativos ao valor médio das concentrações de Fe, Zn, Mn e Cu, mediana, desvio padrão, podem ser vistos na Tabela 2.

Os resultados do biomonitoramento ativo dos metais mostraram que as concentrações variaram entre áreas e entre distâncias de forma diferente para cada um dos elementos analisados (Tabela 2). As concentrações gerais dos elementos em todos os locais diminuíram na seguinte ordem: Fe > Zn > Mn > Cu. As concentrações de ferro (Fe) foram, de forma geral, elevadas em todas as áreas estudadas, sendo estas maiores na área da sub-sede de Guapimirim . Já o zinco (Zn) atingiu sua máxima concentração no Vale do Garrafão (Tabela 2). O manganês (Mn) apresentou maior concentração na sede do PARNASO em Teresópolis (Tabela 2). Por outro lado, o cobre (Cu), que foi o elemento com a menor concentração entre os analisados, apresentou níveis semelhantes em todas as áreas estudadas (Tabela 2).

REGIÃO	SUBREGIÃO	DISTÂNCIA DA RODOVIA	VELOCIDADE DA RODOVIA (km/h)	COBERTURA FLORESTAL	Fe (ug/g)	Zn (ug/g)	Mn (ug/g)	Cu (ug/g)
Controle			60		180	6	5	2
SS/GUAPIMIRIM				media ± desvp; mediana min - max 11% ± 0.06	media ± desvp; mediana min - max 384 ± 77	media ± desvp; mediana min - max 12 ± 3.09	media ± desvp; mediana min - max 16 ± 0.81	media ± desvp; mediana min - max 2 ± 1.07
	GUA-01	15	60	15% 2% - 17% 26% ± 0.07	409 279 - 464 518 ± 29	14 8 ± 15 13 ± 0.81	17 16 ± 18 10 ± 0.81	2 0,4 ± 3 4 ± 0.47
	GUA-02	515	60	22% 21% ± 37% 28% ± 0.16	534 477 - 544 376 ± 67	13 12 ± 14 12 ± 1.24	10 9 ± 11 9 ± 0.47	4 4 ± 5 3 ± 0.47
	GUA-03	1030	60	29% 7% ± 47%	387 289 - 451	12 10 ± 13	9 9 ± 10	3 2 ± 3
VALE DO GARRAFÃO								
	GAR - 02	15	40	26% ± 0.07 27% 20% ± 37%	479 ± 26 468 454 ± 514	28 ± 2.48 27 25 ± 31	7 ± 4.10 6 2 ± 12	4 ± 0.47 4 4 ± 5
	GAR - 02	515	40	6% ± 0.00 6% 5% ± 7%	238 ± 60 213 180 ± 321	20 ± 13.96 12 9 ± 40	7 ± 7.58 3 3 ± 18	2 ± 0.47 2 2 ± 3
	GAR - 03	1030	40	11% ± 0.01 11% 9% ± 12%	359 ± 88 310 285 ± 483	14 ± 2.82 12 12 ± 18	9 ± 2.49 10 6 ± 12	3 ± 0 3 3 ± 3
SANT. ECOLÓGICO								
	SEC-01	15	40	28% ± 0.04 28% 22% ± 33%	330 ± 49.81 331 268 ± 390	14 ± 1.24 14 13 ± 16	9 ± 1.24 9 9 ± 11	3 ± 0 3 3 ± 3
	SEC-02	515	40	32% ± 0.04 34% 25% ± 36%	415 ± 86.15 427 304 ± 514	11 ± 1.24 11 10 ± 13	14 ± 11.81 7 5 ± 31	3 ± 0 3 3 ± 3
	SEC-03	1030	40	31% ± 0.02 31% 29% ± 34%	293 ± 24.60 296 261 ± 321	12 ± 2.49 11 9 ± 15	22 ± 6.23 24 14 ± 29	3 ± 0.94 4 2 ± 4
SEDE TERESÓPOLIS								
	SED - 01	15	60	7% ± 0.01 7% 6% ± 8%	442 ± 70.78 396 388 ± 542	13 ± 2.05 13 11 ± 16	30 ± 6.64 26 24 ± 30	4 ± 0.47 4 3 ± 4
	SED - 02	515	60	19% ± 0.18 11% 2% ± 44%	216 ± 11.84 216 201 ± 230	11 ± 0.81 11 10 ± 12	21 ± 2.49 22 18 ± 24	3 ± 0 3 3 ± 3
	SED - 03	1030	60	9% ± 0,03 8% 7% ± 13%	228 ± 9.93 222 220 ± 242	11 ± 0.81 11 10 ± 12	26 ± 7.13 24 19 ± 36	3 ± 0 3 3 ± 3

Não foram observadas diferenças significativas ( $p > 0,05$ ) nas concentrações de Fe (KW = 6,18;  $p = 0,10$ ), Zn (KW = 4,77;  $p = 0,18$ ) e Cu (KW = 0,31;  $p = 0,91$ ) entre as diferentes

áreas da rodovia Rio – Teresópolis da BR-116 que abrange o PARNASO. Entretanto, para amostras de Mn foram observadas diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) quanto às suas concentrações (Figura 9). Como duas de suas variáveis apresentaram uma não normalidade dos dados, foi aplicado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis ( $KW = 16,60$ ;  $p = 0,0009$ ). Essa diferença foi observada nas médias das concentrações entre a sub-sede Guapimirim e a Sede Teresópolis, assim como, Vale do Garrafão e a Sede em Teresópolis.

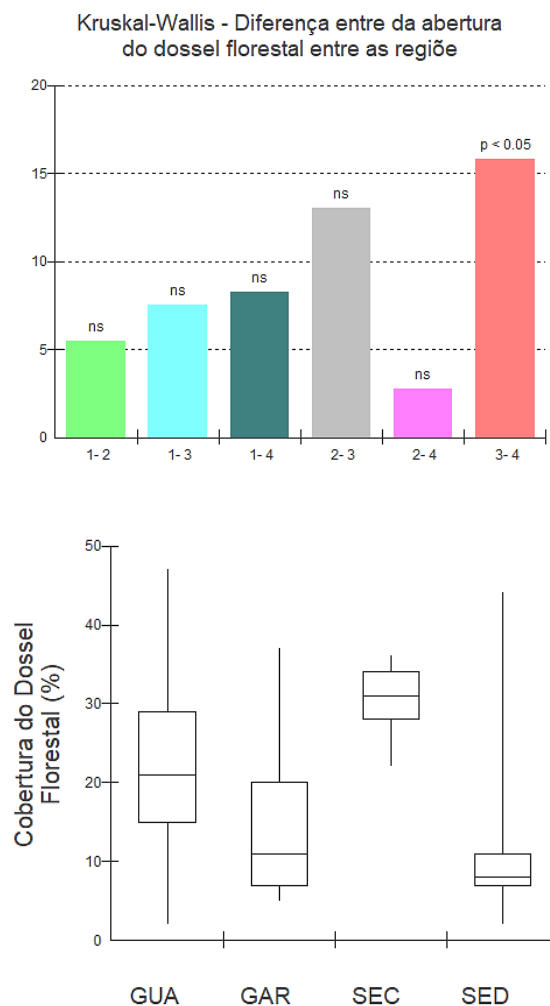


**Figura 9.** Concentrações ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ ) de Fe, Zn, Mn e Cu, nos indivíduos de *Tillandsias usneoides* coletadas na sede do PARNASO e transplantadas em quatro diferentes áreas do respectivo parque: GUA (sub-sede do PARNASO Guapimirim), GAR (região do Vale do Garrafão), SEC (região do Santuário Ecológico), SED (região sede do PARNASO Teresópolis).

#### B) Diferenças entre as porcentagens da cobertura do dossel florestal

Dados referentes à porcentagem média da cobertura do dossel florestal concernentes às regiões, são mostradas na figura 10. Foram observadas diferenças significativas entre as

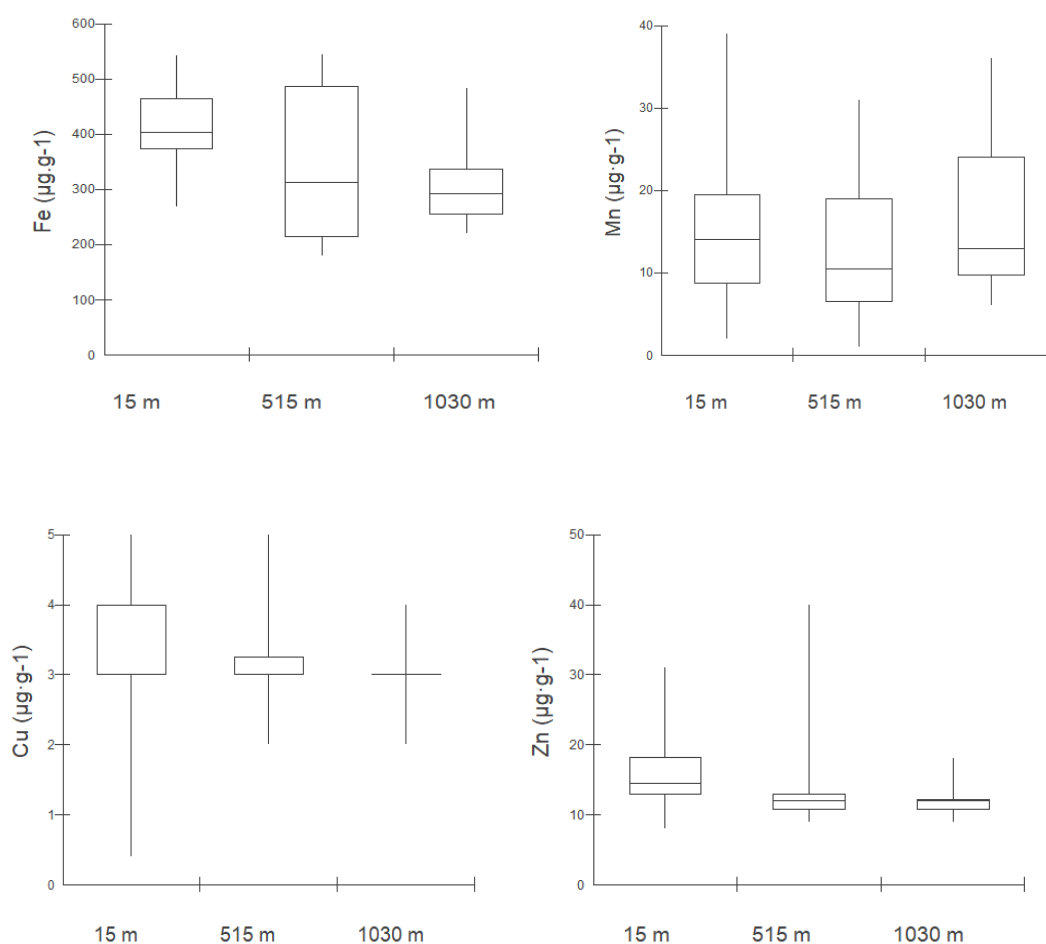
áreas do Santuário Ecológico e Sede do PARNASO em Teresópolis (KW= 11,87;  $p = 0,0078$ ). Esse fato está relacionado a discrepância na porcentagem média entre as duas regiões, uma vez que SEC apresentou o maior percentual de cobertura florestal em comparação a SED, como pode ser conferido na Tabela 2.



**Figura 10.** Padrão de porcentagem da Cobertura do Dossel Florestal dos pontos amostrais onde foram transplantadas as amostras de *Tillandsia usneoides* nas quatro regiões do PARNASO: GUA (sub-sede do PARNASO Guapimirim), GAR (região do Vale do Garrafão), SEC (região do Santuário Ecológico), SED (região sede do PARNASO Teresópolis). O P-value  $< 0,05$  mostrou uma diferença significativa entre as classes 3 e 4 (Santuário Ecológico e Sede), como mostra o boxplot ao lado.

C) Diferenças nas concentrações dos metais em relação a distância da BR-116.

O teste de Kruskal Wallis também foi realizado para verificar se há diferenças significativas entre as concentrações de Fe, Zn, Mn e Cu nas *Tillandsias usneoides* das quatro regiões do PARNASO em relação a variável distância da rodovia (Figura 11). Não houve diferença significativa para os elementos Fe (KW = 31;  $p = 0,1156$ ), Mn (KW = 1,01;  $p = 0,6025$ ) e Cu (KW = 0,8069;  $p = 0,6336$ ). Contudo, o teste detectou a presença de uma diferença significativa para o elemento Zn (KW = 6,70;  $p = 0,0349$ ), indicando que a acumulação foi maior nas *T. usneoides* que estavam mais próximas a borda da rodovia (15 m), quando comparado a regiões mais afastadas (515 m e 1.030 m).



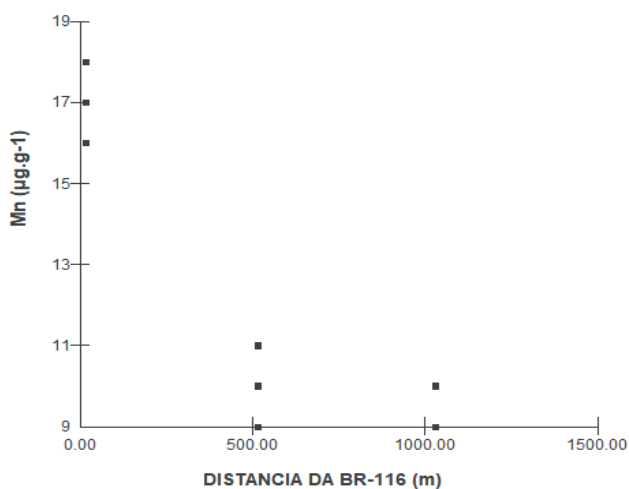
**Figura 11.** Padrão de relação entre a concentração ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) e a variável distância da rodovia com os pontos amostrais onde foram transplantadas as amostras de *Tillandsia usneoides* nas quatro regiões do PARNASO: GUA (sub-sede do PARNASO Guapimirim), GAR (região do Vale do Garrafão), SEC (região do Santuário Ecológico), SED (região sede do PARNASO Teresópolis).

D) Teste de correlação da concentração com as variáveis: cobertura florestal, distância da rodovia.

Foi realizado o teste de correlação de Spearman entre as variáveis independentes para verificar a influência do índice de cobertura florestal e distância da rodovia na distribuição de elementos – traço nas regiões do PARNASO. Para a correlação RS Spearman foi adotado uma escala de classificação sugerida por Rumsey (2019), dada em: correlação fraca (RS = 0,10 a 0,40), correlação moderada (RS = 0,50 a 0,60), correlação forte (RS = 0,70 a 1,0).

No que se refere a cobertura florestal, não houve correlação significativa com a concentração de nenhum dos elementos estudados: Fe (RS= 0.2305), Zn (RS = 0.151), Mn (RS=-0.1349) e Cu (RS = 0.1968). Logo, o dossel florestal das regiões do PARNASO não influencia na distribuição e captação dos poluentes gerados pelo ao tráfego rodoviário.

Em contrapartida, para a variável distância da rodovia, o Fe (RS = -0.5798) e o Cu (RS = -0.6547) apresentaram uma correlação significativa, de classificação moderada, para a área da SED, indicando uma possível tendência na diminuição na acumulação de particulados a medida que ocorre o afastamento da borda da rodovia; assim como ocorre com a acumulação dos elementos Zn e Cu para a região de GAR. Todavia, o único elemento que obteve uma correlação significativa, forte, foi o Mn, isso para a área de GUA (RS = -0.8345), que apresentou uma forte correlação negativa indicando que quanto mais afastado a *T. usneoides* está da rodovia, menor a presença do Mn (Figura 12).



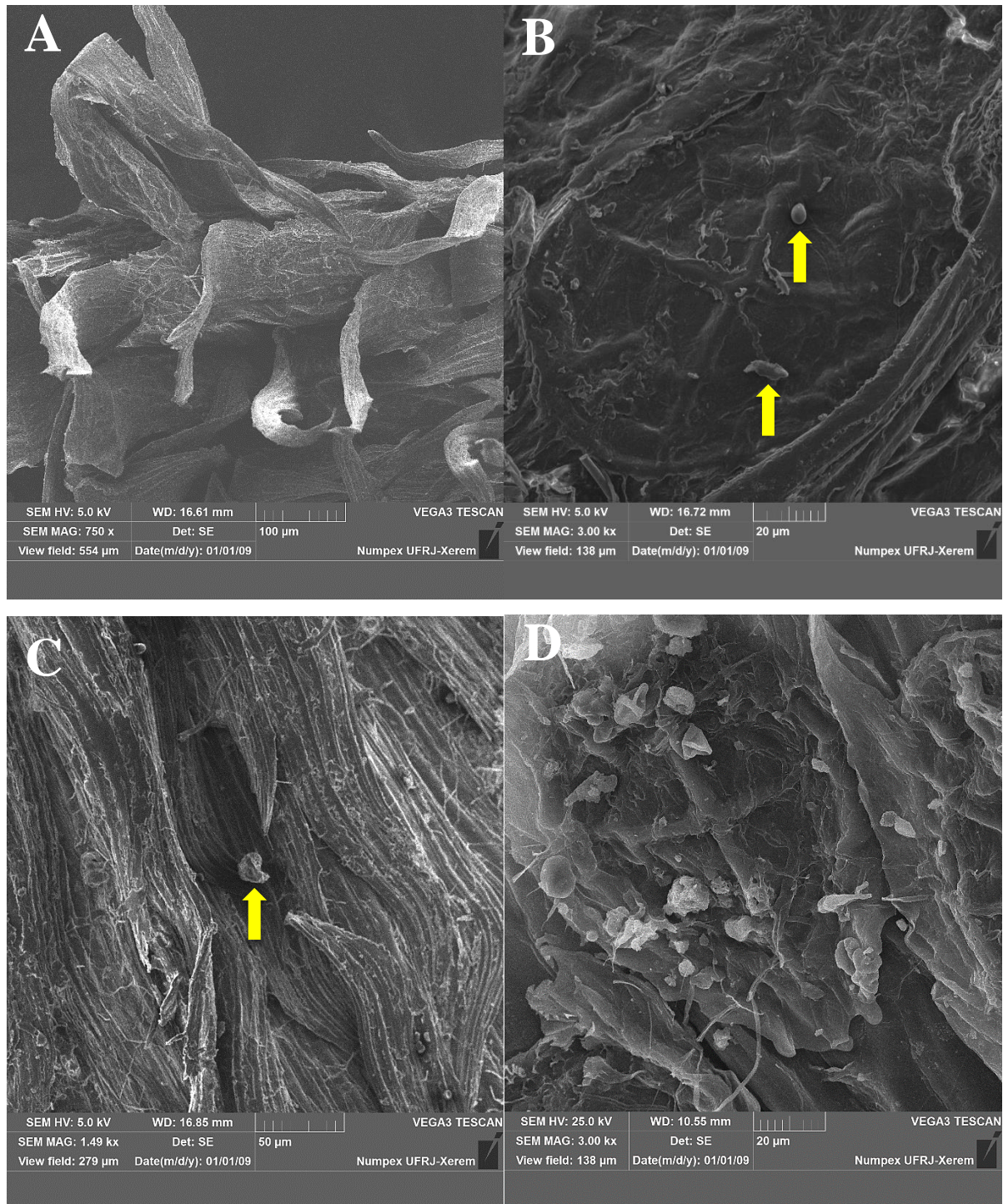
**Figura 12.** Gráfico de correlação entre a concentração de Mn ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ ) e a variável distância da rodovia com os pontos amostrais onde foram transplantadas as amostras de *Tillandsia usneoides* na região de GUA (sub-sede do PARNASO Guapimirim).

## 4.2 Material Particulado

A) Contagem, identificação e composição das micropartículas



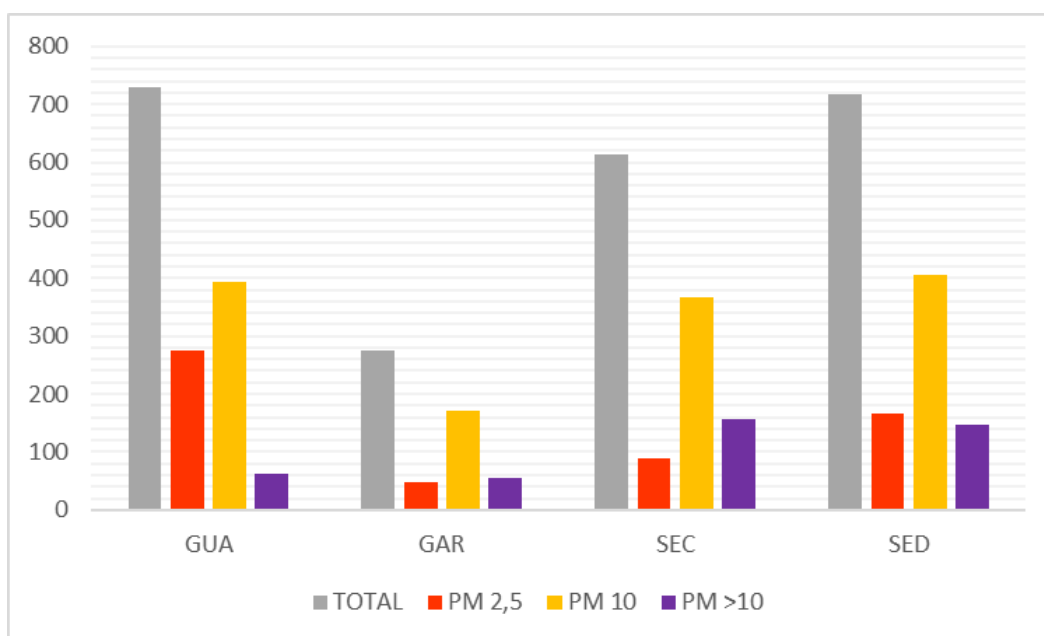
A partir da amostragem ativa com *T. usneoides* e análise no MEV-EDS (Figura 13) foram identificadas um total de 2336 partículas individuais nas frações de 15 m e 1.030 m, sendo 730 na sub-sede em Guapimirim (GUA), 275 no Vale do Garrafão (GAR), 613 no Santuário Ecológico (SEC) e 718 na Sede em Teresópolis (SED) (Gráfico 1).



**Figura 13.** Imagens geradas através da análise da *Bromélia Tillandsia usneoides* L. (L.) no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). A) células epidérmicas da *Tillandsia usneoides*. B) escama epidérmica evidenciando as células do escudo, com a presença de micropartículas (seta). C) célula epidérmica com a presença de micropartícula (seta). D) célula do escudo com presença de micropartículas.

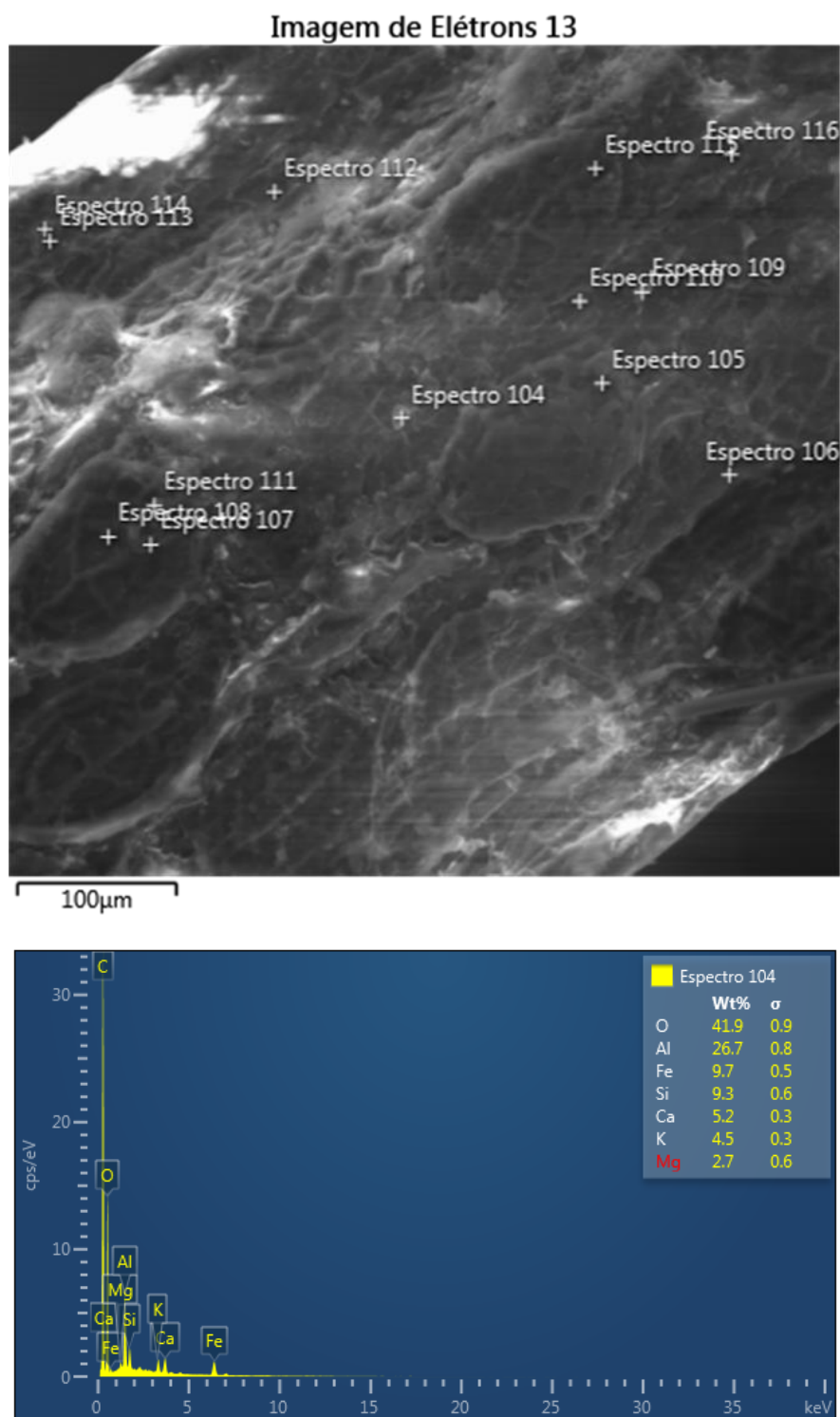
A distribuição granulométrica e classificação do PM 2,5, PM 10 e > PM 10 seguiu do seguinte modo: um padrão de micropartículas de menor diâmetro ( $\leq 2,5 \mu\text{m}$ ) foram definidas como MP 2,5 representando em torno de 25% das partículas totais; um padrão de micropartículas com diâmetro médio ( $\geq 2,6$  a  $\leq 10,5 \mu\text{m}$ ) foram definidas como MP 10 e representou cerca de 57% do total; ao passo que, micropartículas com diâmetro superior a  $10 \mu\text{m}$  foram contabilizadas e definidas como > 10  $\mu\text{m}$ , representando 18 % das partículas totais.

**Gráfico 1.** Quantificação Material Particulado Total (MPT), com diâmetro 2,5 (MP2,5), diâmetro maior que 2,6 e inferior ou igual a 10 (MP 10) e maior que 10 (MP>10) por região: Sub-sede Guapimirim (GUA), Vale do garrafão (GAR), Santuário Ecológico (SEC) e Sede Teresópolis (SED).



Na matriz de composição química de todos os materiais particulados, fora representada majoritariamente pelos elementos (Figura 14): oxigênio (O), ferro (Fe), alumínio (Al), cloro (Cl), potássio (K), cálcio (Ca), fósforo (P), enxofre (S), silício (Si), titânio (Ti), magnésio (Mg), molibdênio (Mo), sódio (Na), fósforo (P) e índio (In). Outros elementos menos abundantes também foram detectados em algumas amostras, como: antimônio (Sb) na região SEC, a 15 m de distância da rodovia;





**Figura 14.** A) Tecido epidérmico de uma amostra de *T. usneoides* visto no microscópio eletrônico de varredura com energia dispersiva de raio x (MEV-EDS) com sobreposição dos espectros das micropartículas aderidas. B) Exemplo da composição química de uma micropartícula aderida (espectro 104).

A quantificação ambiental de MP registrada em locais do PARNASO espacialmente distintos é mostrada na Tabela 3. Na contagem de Material Particulado Total (MPT) foi observada uma maior concentração dos MPTs na área de Guapimirim, seguida por Teresópolis e Santuário Ecológico, enquanto um valor mais baixo foi registrado na área do Vale do Garrafão. O mesmo padrão de distribuição foi observado para contagem de micropartículas com diâmetro igual ou inferior a 2,5  $\mu\text{m}$  ( $\text{MP} \leq 2,5$ ) e com diâmetro superior a 2,6  $\mu\text{m}$  e igual ou menor a 10  $\mu\text{m}$  ( $\text{MP} \leq 10$ ). Com relação às partículas com diâmetro superior a 10  $\mu\text{m}$  ( $\text{MP} > 10$ ) as maiores quantidades foram registradas na seguinte ordem: Santuário Ecológico, Sede Teresópolis, Guapimirim e Vale do Garrafão.

**Tabela 3.** Quantificação de Material Particulado. As áreas correspondem a: GUA (Guapimirim), GAR (Vale do Garrafão), SEC (Santuário Ecológico) e SED (Sede Teresópolis). Os números 1, 2 e 3 representam as distâncias da beira da BR-116, sendo: 1 (15m), 2 (515 m) e 3 (1.030 m). MP Total corresponde à contagem do número de Material particulado total, MP 2,5 à micropartículas com diâmetro igual ou inferior a 2,5  $\mu\text{m}$ , MP10 à micropartículas com diâmetro maior que 2,6  $\mu\text{m}$  e inferior a 10  $\mu\text{m}$ , enquanto, MP > 10 representa micropartículas superiores a 10  $\mu\text{m}$ . Continua.

ÁREA	MP TOTAL	MP $\leq 2,5$	MP $\leq 10$	MP > 10
GUA-01	131	49	60	22
GUA-01	34	12	19	3
GUA-02	27	2	22	3
GUA-02	282	59	199	24
GUA-03	216	134	73	9
GUA-03	40	18	20	2
GAR-01	83	13	52	18
GAR-01	49	19	29	1
GAR-02	88	10	59	19
GAR-02	22	0	15	7
GAR-03	25	7	11	7
GAR-03	8	0	4	4
SEC-01	161	26	102	33
SEC-01	171	37	115	19

SEC-02	197	8	104	85
SEC-02	31	9	20	2
SEC-03	34	10	16	8
SEC-03	19	0	10	9
SED-01	304	109	151	44
SED-01	284	27	173	84
SED-02	13	1	10	2
SED-02	46	12	27	7
SED-03	32	15	17	0
SED-03	39	2	28	9

---

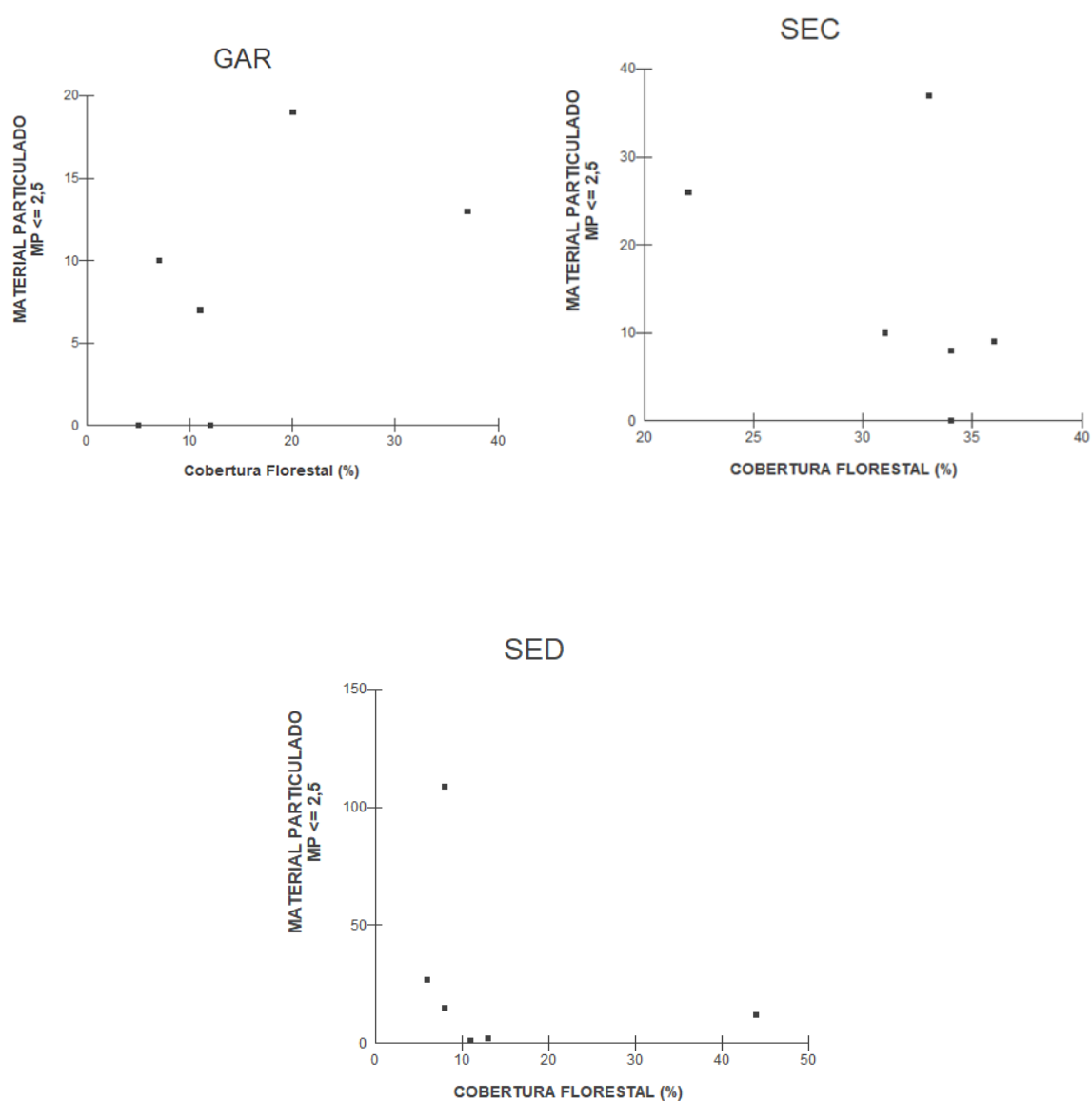
Para todas as áreas de estudo, não foram observadas diferenças significativas em relação às essas distintas classes de Material Particulado (Tabela 4).

**Tabela 4.** Resultado do Teste não paramétrico de Kruskal-Wallis para testar se houve diferenças significativas das áreas de Guapimirim (GUA), Vale do Garrafão (GAR), Santuário Ecológico (SEC), Sede Teresópolis (SED), entre as diferentes classes de Material Particulado: Material Particulado Total (MPT), Material Particulado com diâmetro igual ou inferior a 2,5 µm, MP 10 à micropartículas com diâmetro maior que 2,6 µm e inferior a 10 µm, e, MP > 10 que representa micropartículas superiores a 10 µm.

ÁREA	MPT	MP 2,5	MP 10	MP > 10
GUA	KW = 0.28; P = 0.8669	KW = 0.86; P = 0.6514	KW = 2; P = 0.5642	KW = 0.95; P = 0.6201
GAR	KW = 2; P = 0.3679	KW = 3.5; P = 0.1738	KW = 3.43; P = 0.1801	KW = 1.40; P = 0.4973
SEC	KW = 2; P = 0.3679	KW = 3.43; P = 0.1801	KW = 3.71; P = 0.1561	KW = 1.14; P = 0.5647
SED	KW = 3.43; P = 0.1801	KW = 3.71; P = 0.1561	KW = 2; P = 0.1561	KW = 3.43; P = 0.1801

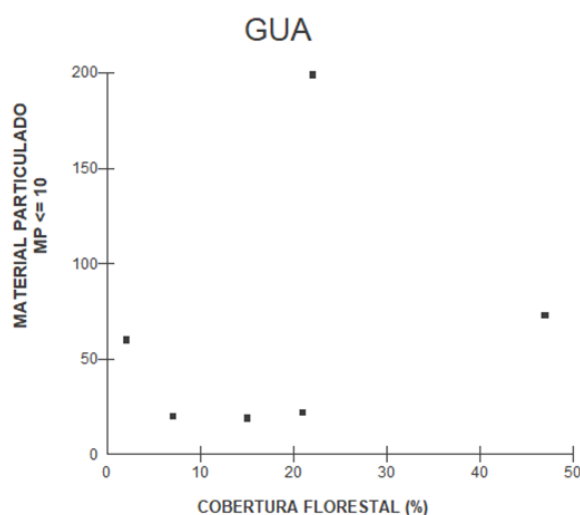
A) Teste de correlação das classes de Material Particulado com as variáveis cobertura florestal, distância da rodovia.

Através do teste de correlação de Spearman foi possível verificar que não houve correlação da variável cobertura florestal com a quantidade de MPT para nenhuma área do PARNASO: GUA (RS = 0.3714), GAR (RS = 0.2), SEC (RS = -0.2899), SED (RS = -0.3189). Para a classe de micropartículas finas, MP 2,5, não houve uma tendência de correlação para a área de GUA (RS = 0.4286), entretanto, uma moderada influência da cobertura florestal pode ser observada para as regiões do GAR (RS = 0.6377), SEC (RS = -0.6377) e SED (RS = -0.6667) (Figura 15).



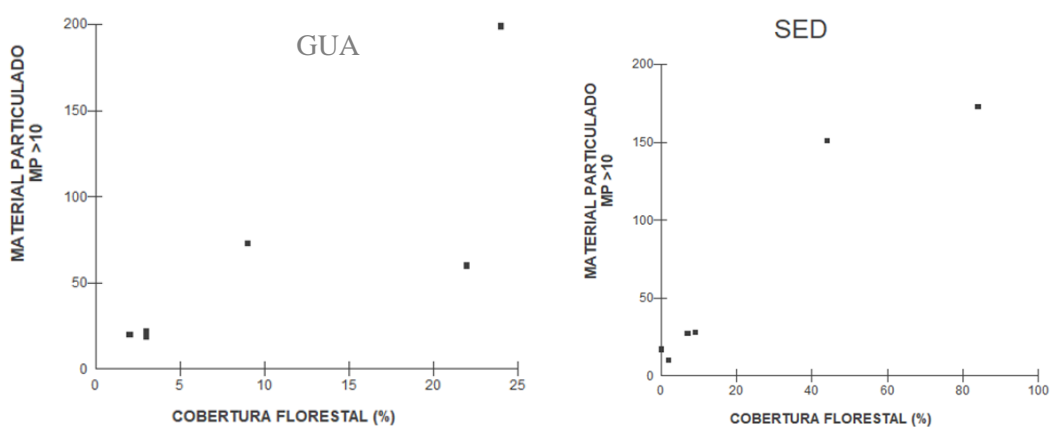
**Figura 15.** Gráficos de correlação significativa entre a quantidade de material particulado com diâmetro inferior ou igual a 2,5  $\mu\text{m}$  (MP 2,5) e a variável cobertura florestal para as áreas que correspondem ao PARNASO: Vale do Garrafão (GAR), Santuário Ecológico (SEC) e Sede Teresópolis (SED).

Com relação a micropartículas grossas, MP 10, GUA ( $RS = 0.5429$ ) foi a única região que apresentou uma moderada influência da cobertura florestal na distribuição dessa classe de particulado (Figura 16); GAR ( $RS = 0.0857$ ), SEC ( $RS = -0.1449$ ) e SED ( $RS = -0.4638$ ).



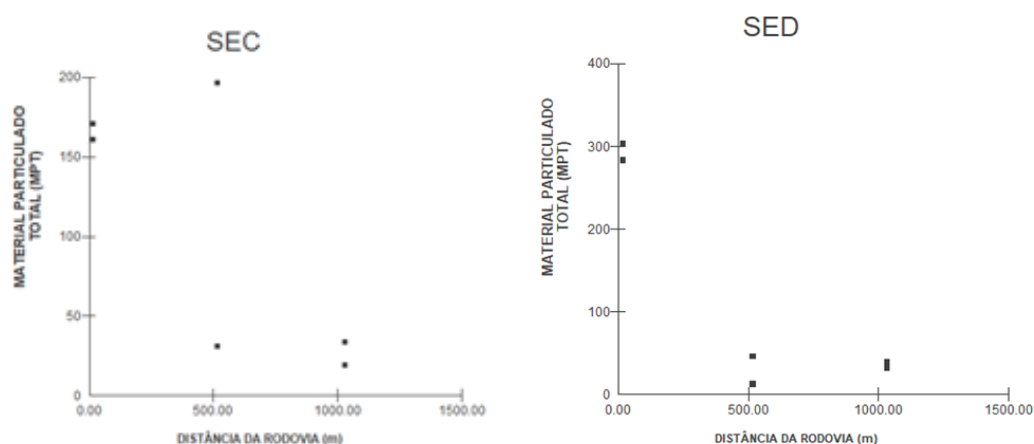
**Figura 16.** Gráficos de correlação significativa entre a quantidade de material particulado com diâmetro entre 2,6  $\mu\text{m}$  ou igual a 10  $\mu\text{m}$  (MP 10) e a variável cobertura florestal representando a área do Vale do Garrafão (GAR).

Já para partículas acima de 10  $\mu\text{m}$ , as únicas áreas que apresentaram uma forte correlação foram GUA ( $RS = 0.8407$  e SED ( $RS = 0.9429$ ) (Figura 17).



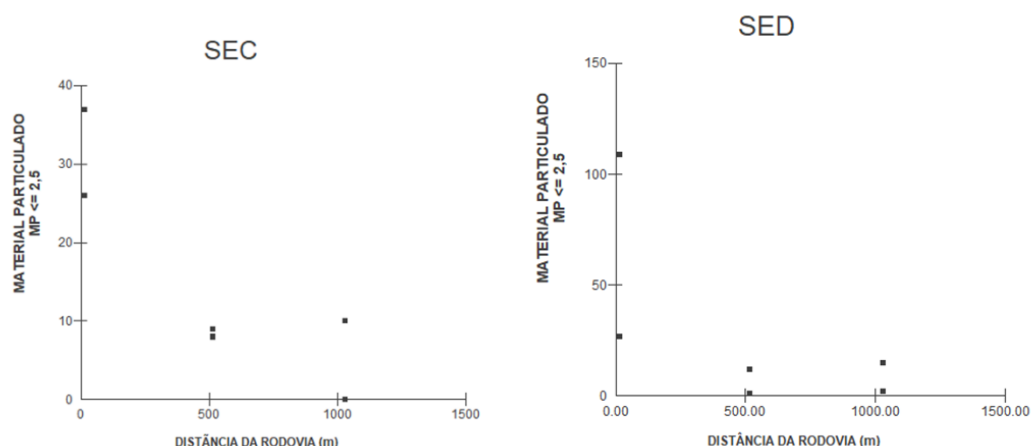
**Figura 17.** Gráficos de correlação entre as variáveis: quantidade de micropartículas grossas, com diâmetro acima de 10  $\mu\text{m}$ , e índice de cobertura florestal para as áreas da Sub-sede Guapimirim (GUA) e Sede Teresópolis (SED).

Com relação a influência das distâncias, as únicas áreas que obtiveram distribuição de MPT significativa foram: SEC ( $RS = -0.5976$ ) que apresentou uma correlação moderada, e SED ( $RS = -0.7171$ ) uma forte correlação (Figura 18).



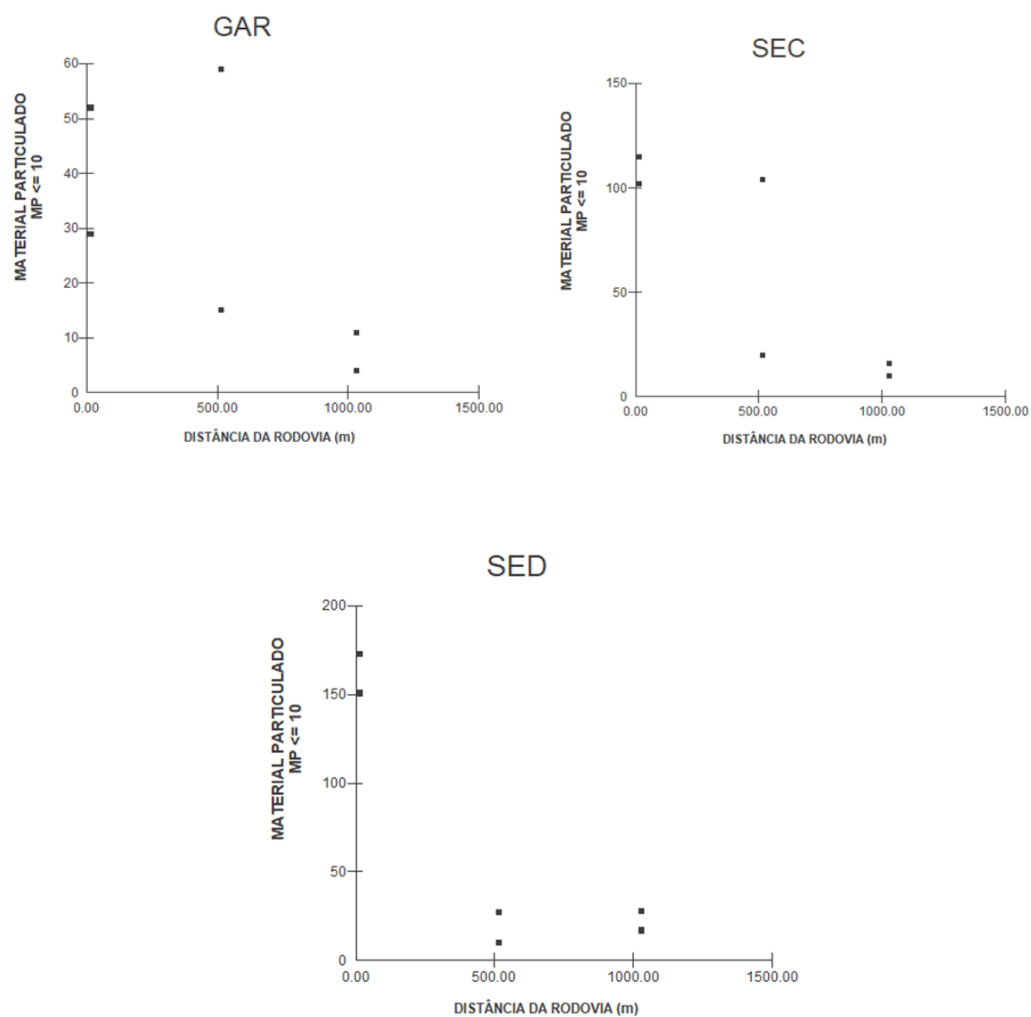
**Figura 18.** Gráficos de correlação entre as variáveis: quantidade de Material Particulado Total (MPT), e distância da rodovia em metros (m), para as áreas do Santuário Ecológico (SEC) e Sede Teresópolis (SED).

Para MP 2,5, a correlação foi inversa, SEC ( $RS = -0.7171$ ) apresentou uma correlação significativa forte, enquanto SED ( $RS = -0.5976$ ) moderada (Figura 19).



**Figura 19.** Gráficos de correlação entre as variáveis: a quantidade de material particulado com diâmetro inferior ou igual a 2,5  $\mu m$  (MP 2,5), e distância da rodovia em metros (m), para as áreas do Santuário Ecológico (SEC) e Sede Teresópolis (SED).

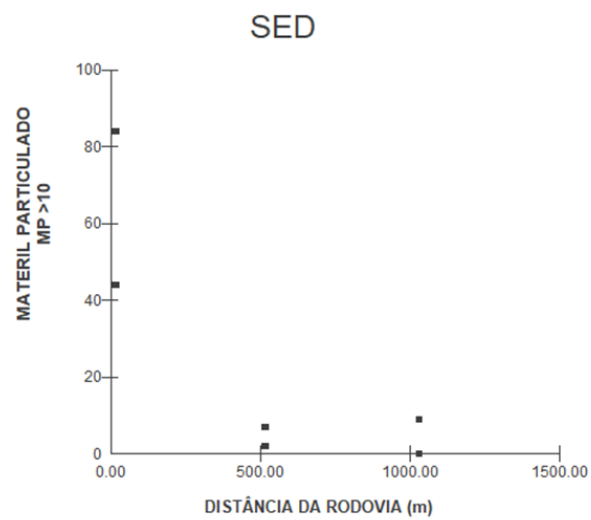
Em relação ao MP 10, a distância não obteve uma influência significativa na distribuição dessas partículas para a área de GUA ( $RS = 0.239$ ), porém, nas áreas de GAR ( $RS = 0.7171$ ) se SEC ( $RS = -0.8367$ ) essa influência foi forte, enquanto para SED ( $RS = -0.5976$ ) moderada (Figura 20).



**Figura 20.** Gráficos de correlação entre as variáveis: a quantidade de material particulado com diâmetro entre 2,6  $\mu\text{m}$  e 10  $\mu\text{m}$  (MP 10), e distância da rodovia em metros (m), para as áreas de Vale do Garrafão (GAR), Santuário Ecológico (SEC) e Sede Teresópolis (SED).

Enquanto para  $\text{MP} > 10$ , SED ( $\text{RS} = -0.7171$ ) foi a única área que obteve correlação significativa forte com a distância (Figura 21).





**Figura 21.** Gráficos de correlação entre as variáveis: a quantidade de material particulado, micropartículas grossas, acima de  $10\mu\text{m}$ , e distância da rodovia em metros (m), para a área da Sede Teresópolis (SED).

## 5. DISCUSSÃO

### 5.1 Elementos - traço

De acordo com esse estudo, o elemento Fe obteve as maiores concentrações em relação aos demais elementos traços em todas as suas regiões, obtendo uma distribuição uniforme tanto próximo a borda da rodovia (15 m) como na distância mais afastada da rodovia (1.030 m). Parte desse resultado deve-se a três fatores: (1) ao óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) como substância constituinte da estrutura química da *T. usneoides* (PARRA, 2019); (2) associação com a emissão crustal do solo, que é o processo pelo qual minerais ricos em ferro são liberados para a superfície através de fenômenos como a intemperização de minerais e a decomposição de rochas, principal fonte de ferro na crosta terrestre, o que, segundo Andrade *et al* (2012) está relacionada com elevadas cargas de Al, Si, Ca, Ti e Fe; e (3) ao processo das emissões veiculares. Assim, dentre os outros elementos estudados, o ferro é o metal mais abundante na fração sólida (não volátil) das partículas ultrafinas presentes na poluição do ar urbano.

Desse modo, micropartículas contendo ferro são liberadas predominantemente como subprodutos da combustão e fricção (atrito), provenientes de várias fontes, como a indústria (por exemplo, geração de energia, incineradores, siderúrgicas). No entanto, no contexto das emissões veiculares, as fontes de não exaustão dos veículos, especialmente o desgaste dos freios, juntamente com as emissões provenientes do escapamento (combustível, óleo, catalisador e desgaste do motor), são as principais contribuições para a presença desse elemento na atmosfera (MAHER *et al*, 2016).

Análises laboratoriais definiram a composição elementar dos elementos constituintes do sistema de freios (HAGINO *et al*, 2016.; KUKUTSCHOVÁ *et al*, 2011.; CHANDRA *et al*, 2015) e mostraram que as pastilhas de freio revelam uma predominância de Ba, Cu, Fe, Mn, Ti e Zn em sua constituição metálica. Quanto aos discos de freio, destaca-se que o ferro (Fe) é apontado como o elemento mais proeminente (HULSKOTTE *et al*, 2014).

Já no processo de exaustão, a emissão de partículas de ferro pela exaustão de veículos ocorre principalmente devido à presença de componentes metálicos nos combustíveis e no próprio veículo. Durante a combustão, pequenas partículas contendo ferro podem ser liberadas para a atmosfera através dos gases de escape. Estudos indicam que o teor de ferro nas emissões de veículos está relacionado a vários fatores, incluindo o tipo de combustível, o desgaste de componentes do motor e a presença de aditivos (SASSYKOVA; *et al*, 2018.; GIECHASKIEL; *et al*, 2014)

Durante a frenagem, especialmente em sistemas de freios a disco, as pastilhas de freio e os discos entram em contato, resultando no desgaste gradual desses componentes. Esse desgaste gera a liberação de pequenas partículas de ferro no meio ambiente, que podem se dissipar pelo ar e se depositar em plantas, animais e no solo. Elas também podem conter não apenas ferro, mas também outros metais presentes nos componentes dos freios, como cobre e zinco; o que explica o alto teor de Zn em amostras transplantadas mais próximas ao limite da estrada no Vale do Garrafão, uma área urbanizada que contém alto índice de entrada e saída de veículos, realizando a frenagem de veículos pesados como ônibus, e que possui em seu trecho da BR-116 uma faixa de velocidade 40 km/h, que também é a mesma faixa de quilometragem da região do Santuário Ecológico, local onde obteve a segunda maior concentração média de Zn, dando a entender que em pistas com menor velocidade há uma tendência maior de dispersão desse elemento para atmosfera. Fato esse que também está intrinsecamente ligado ao processo de frenagem, uma vez que, existe no trecho do Vale do Garrafão uma curva acentuada e perigosa que obriga veículos leves e pesados a obedecerem

ao limite de velocidade estabelecido para o trecho, fazendo com que haja uma redução da velocidade nos dois sentidos da pista.

No sentido Guapimirim-Teresópolis (subida), para que o condutor realize a passagem na curva, é iniciado um processo de redução de uma marcha para que haja diminuição da velocidade, levando o motor a fazer mais força, induzindo o rotor de distribuição a um maior desgaste do componente e elevada distribuição de zinco para atmosfera, fauna e flora local. Vale ressaltar que, em veículos com sistema de ignição mais antigo, com a presença de distribuidor, durante o processo de desaceleração, o rotor de distribuição gira junto com o motor. Isso permite que o distribuidor envie corrente elétrica para as velas de ignição, ajustando o tempo de ignição e controlando a combustão no cilindro do motor, fazendo com que durante o processo de desaceleração, a quantidade de combustível injetada pode ser reduzida para economizar energia, e o rotor de distribuição ajuste o momento certo da ignição. Nos sistemas de ignição mais recentes, como os sistemas de ignição direta ou distribuição eletrônica, a função do rotor de distribuição é substituída por outros componentes que controlam eletronicamente o tempo de ignição, otimizando a eficiência do motor em várias condições, incluindo o processo de desaceleração (PUJATTI, 2007; KUMAGAI, 2022).

No entanto, no sentido contrário (descida da pista), o processo de distribuição de particulado de Zn ocorre de maneira intensificada através da frenagem. Em função da mudança de velocidade, o condutor necessita frear o veículo para que haja redução da marcha e passe para uma mais potente a fim de realizar a passagem pela curva, o que ocasiona um maior desgaste da pastilha de freio com o disco de tração, componentes, que assim como os pneus, apresentam o zinco em sua composição.

Estudos científicos têm se debruçado sobre a caracterização e os efeitos da exaustão de zinco proveniente de veículos. Um estudo conduzido por Pesonen *et al.* (2019) analisou as partículas liberadas pela abrasão dos pneus e discos de freio em estradas pavimentadas. Os resultados indicaram que o zinco estava presente em concentrações significativas nessas partículas, contribuindo para a poluição do ar local.

Além disso, as atividades de tráfego nas rodovias são um dos principais contribuintes para a liberação de zinco na atmosfera. Pesquisas como a de Adam *et al.* (2020) destacam a importância de entender a dinâmica das partículas de zinco na exaustão veicular e seu impacto na qualidade do ar urbano. Esses estudos enfatizam ainda a necessidade de implementar medidas para reduzir as emissões de zinco provenientes do tráfego rodoviário.

Um outro estudo realizado por Ravish e Swamy (2021) analisaram as práticas de gestão de tráfego e seus efeitos na liberação de zinco. Medidas como a redução de velocidade, controle de congestionamento e manutenção eficiente de estradas foram identificadas como eficazes na minimização das emissões de zinco.

No que se refere a dispersão do manganês, as maiores concentrações foram encontradas na região sede do PARNASO em Teresópolis. Em comparação com as outras áreas, esse fato pode estar associado a três causas: (1) o combustível, (2) a velocidade e (3) tipo de veículo. As emissões provenientes do uso de combustíveis estão interligadas com a presença do Metilciclopentadienil Manganês Tricarbonil (MMT) como aditivo do manganês. De acordo com o International Council on Clean Transportation (2009, p.15) aproximadamente 25% do peso molecular do MMT é composto por manganês. Este aditivo organometálico é utilizado há mais de 50 anos, como um agente “antidetonação” substituto do chumbo na gasolina, e tem como função aumentar a octanagem da gasolina e melhorar o desempenho dos motores (HOEKMAN; BROCH; 2016). Quando esses combustíveis são queimados nos motores dos veículos, ocorre a liberação de partículas que contêm manganês na atmosfera. Além disso, a abrasão de peças metálicas dos motores e sistemas de exaustão também contribui para a dispersão desse tipo de poluente. Estas partículas, muitas vezes na faixa de MP10, podem

permanecer suspensas no ar e serem transportadas por correntes atmosféricas, espalhando-se por áreas de proteção natural, urbanas e industriais.

Outro fator que diferencia região sede das demais regiões e corrobora para esse resultado, se baseia no fato da sede do PARNASO obter um maior índice de trânsito de veículos leves (como carros e motocicletas, que possuem sistema de alimentação de combustível por gasolina), que está diretamente associado ao fluxo de visitação da área.

Segundo o estudo realizado por Andrade *et al* (2012), elevadas cargas dos elementos Cr e Ni, que aparecem nos espectros de raio x, tal qual, baixas cargas de Cl, Mn e Cu estão relacionadas às emissões de veículos leves. Já as emissões veiculares associadas às frotas pesadas que são alimentadas a diesel estão relacionadas a altas cargas de Pb e baixas cargas de Cu, Zn e Br. Indo de encontro com os resultados encontrados neste estudo.

Na região sede, o transplante de *T. usneoides* correspondente ao primeiro ponto amostral (15 m de distância da rodovia) foi realizado próximo a rampa de subida ao parque. Na rampa, os veículos só podem ser movidos de 15 a 20 km/h. Sendo assim, o auto fluxo de carros combinado com o deslocamento desacelerado desses veículos, tendem fazer com que haja uma maior disseminação do Mn nesta faixa de distância (borda da rodovia).

## 5.2 Material Particulado

As maiores distribuições de MPT, MP 2,5 e MP 10 foram encontradas na área de GUA e SED, regiões de acesso à visitação e lazer do PARNASO. Esse acontecimento pode estar atrelado a diversos fatores, como por exemplo, agricultura de subsistência, que desempenham um papel crucial na dispersão local do MP, especialmente do MP 2,5, em locais próximos à beira da estrada. Padrões de topografia, como: declividade do terreno, é um fator importante, principalmente na SED, que é uma área mais íngreme, com maior predominância de escarpas montanhosas que podem atuar como barreiras físicas, afetando o padrão de direção das massas de ar (vento), contribuindo para a acumulação de partículas em determinadas áreas.

Áreas elevadas, como montanhas e planaltos de grande altitude, sofrem menos com a presença de poluentes, pois de acordo com o estudo de Wen *et al* (2022), esses locais mais altos exercem efeitos de barreira notáveis e substanciais no impedimento da propagação de poluição MP 2,5 entre regiões. De maneira geral, montanhas de Nível I, caracterizadas por elevada altitude, densidade e cobertura florestal, apresentam barreiras mais eficientes contra a disseminação da poluição em comparação com montanhas de Nível II (com altitude, densidade e cobertura florestal médias) e montanhas de Nível III (de baixa altitude, densidade e cobertura).

Vales ou depressões podem criar canais de vento que afetam a dispersão de partículas, enquanto regiões com maior incidência de escarpas montanhosas podem alterar a direção e a velocidade do vento, impactando a distribuição de MP (FERNANDÉZ – PACHECO *et al*, 2023.; SILVA *et al*, 2023).

Outro fator que também pode estar envolvido nesse resultado é a alteração no índice de velocidade da BR-116. GUA e SED apresentam faixa média de 60 km/h, GAR e SEC, áreas com menores teores de MPs, 40 km/h. Assim, esse resultado tende a indicar que estradas com padrões de velocidade mais altos tendem a ter uma maior distribuição de material particulado. Revelando que elevadas velocidades do tráfego podem resultar em maior agitação e turbulência do ar ao redor das estradas, o que contribui para a ressuspensão e transporte de partículas finas presentes na poluição atmosférica, podendo levar a uma dispersão mais ampla dessas partículas na atmosfera, afetando áreas circundantes, causando um efeito barreira em ecossistemas mais ao interior do parque.

Após análise do teste de correlação, foi possível identificar que o índice de cobertura florestal não foi relevante para a distribuição do MPT em nenhuma das áreas de estudo, todavia, para micropartículas finas, a cobertura florestal denota uma influência moderada para as áreas como GAR, SEC e SED, indicando inclinação para efeito da cobertura vegetal local atuar como um filtro natural, retendo algumas partículas finas, ou até mesmo, dependendo da densidade da vegetação, podendo contribuir para a acumulação ou a remoção de partículas, influenciando a distribuição de MP 2,5. No referido a poluição por MP 10, essa correlação só foi moderadamente significativa para a área de GUA.

Em relação à distância da rodovia, o teste mostrou que a distribuição de MPT tende a ocorrer maior acumulação em locais mais a borda da estrada (15 m) e ir diminuindo com afastamento da BR-116. Esse padrão ocorre de forma moderada para SEC e fortemente para região da SED. Para MP 2,5, esse padrão ocorre de forma bastante influente (correlação forte) para a região de SEC, uma região com arborização densa, com pouco influência antrópica, trilha fechada de difícil acesso; diferentemente da região de SED, que apresentou uma correlação moderada, e GUA e GAR onde a distância não influenciou na distribuição. Em contrapartida, para partículas maiores MP 10, a única região que não obteve uma distribuição ordenada por um padrão decrescente nas distâncias traçadas para o estudo foi GUA.

Frações de MP 2,5 podem manter-se disponíveis na atmosfera por muitas semanas e serem transportadas por longas distâncias (OMS, 2006; KOLLANUS *et al.*, 2017), aumentando o risco da exposição humana por meio do sistema respiratório (KIOUMOURTZOGLOU *et al.*, 2016). A fração de micropartículas grossas (MP 2,6 – 10) tende a conter materiais cristalinos e partículas proveniente da ressuspensão de poeira de rodovias e canteiros de obras; podendo facilmente depositar a curta distâncias (OMS, 2006). Tanto as partículas finas como grossas são importantes indicadores da poluição por gases oriundos da exaustão veicular e não exaustão na exposição de MPs em ambientes de automóveis em estrada.

Uma vez que essas micropartículas são depositadas diretamente no solo, podem influenciar o processo de ciclagem de nutrientes, principalmente a do nitrogênio, através dos seus impactos sobre os fungos e bactérias presentes na rizosfera, alterar a disponibilidade de cátions alcalinos, modificando o pH do solo e, até mesmo, reduzir a interceptação da radiação pelas copas das plantas, deixando o ambiente do parque mais quente, por consequência de uma redução da precipitação através de uma variedade de efeitos físicos (GRANTZ *et al.*, 2003); bem como, causar uma resposta de estresse ao ecossistema local, levando a mudanças no nível da população florística local, por conta dos efeitos dessas respostas em organismos individuais sensíveis em níveis tróficos únicos ou múltiplos (BAZZAZ, 1996).

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com foco na conservação da biodiversidade da área do Parque Nacional da Serra dos Órgãos - PARNASO, este estudo investigou a influência da Rodovia Presidente Dutra (BR-116), trecho Guapimirim – Teresópolis, como possível fonte de disseminação da poluição de origem veicular para a unidade de conservação. A bromeliaceae *Tillandsia usneoides* L. (L.) foi utilizada como uma ferramenta prática e acessível em executar o monitoramento do conteúdo de elementos – traço e material particulado no ar de locais de domínio do parque.

Os principais resultados destacaram que durante o período de exposição da bromélia, o Fe se destacou como elemento que obteve maior concentração. As variações especiais em relação as concentrações dos elementos-traço no ar, podem estar associadas ao tráfego de veículos leves e pesados na rodovia devido à abrasão dos componentes metálicos presentes nos sistemas de freios e na estrutura dos automotores; principalmente em regiões de planícies com menores altitudes, como ocorre na região da sub – sede de Guapimirim (local que obteve a maior concentração de Fe e quantidades de material particulado total), revelando que a topografia local desempenha um papel crucial na dispersão de poluentes através de material particulado, principalmente em áreas com alto índice de montanhas e morros, que funcionam como barreiras físicas e podem alterar os padrões de direção do vento, criando zonas específicas de acumulação de poluentes. Assim também, como a inclinação do terreno, que pode afetar a velocidade e a direção do movimento dessas partículas.

Em relação as variáveis investigadas, o estudo revelou que apesar de algumas regiões não apresentarem uma diferença significativa entre as distâncias, áreas mais próximas a rodovia tendem a receber elevadas cargas de contaminação quando comparadas a locais mais afastados, e conseqüentemente, desencadear maiores alterações ecossistêmicas e mudança de paisagem. Ainda dentro desse aspecto, a cobertura do dossel florestal não se mostrou como um fator de influência no papel de distribuição e acumulação de partículas com a presença de componentes metálicos, indicando que uma grande parte dessas cargas de poluição são realmente provenientes de fontes móveis, em especial por meio do processo de ressuspensão de partículas rodoviárias.

Logo, acredita-se que mais ações e políticas públicas para mitigar as concentrações de MPs, e diversos outros poluentes que estão presentes em sua composição (ex: hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, contaminantes de origem secundária, entre outros), devam concentrar-se na redução das emissões veiculares e na promoção de combustíveis mais limpos, trazendo como incentivo o desenvolvimento de sistemas de transporte baseados em fontes de energia mais limpas. Levando em consideração, espera-se que as iniciativas regulatórias relacionadas a partículas em suspensão sejam não somente impulsionadas pelos impactos desses efeitos na visibilidade, mas principalmente por impactos mais amplos, sobre conseqüências ambientais resultantes da redução da biodiversidade e da perda de bens e serviços ecossistêmicos em unidades de conservação e pela perspectiva humana, de saúde pública.

## REFERÊNCIAS

ARBEX, M. A.; *et al.* **A poluição do ar e o sistema respiratório.** Jornal Brasileiro De Pneumologia, v. 38, n.5, 643–655. 2012.

ANDRADE, M. F.; *et al.* **Vehicle emissions and PM 2.5 mass concentrations in six Brazilian cities.** Air Qual Atmos Health, v. 5, n. 1, 79 – 88. 2012.

ATSDR - AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY. **Putting Communities First: ATSDR Annual Report 2020.** Disponível em: <https://www.atsdr.cdc.gov/2020atsdrannualreport/docs/ATSDR-2020-Annual-Report-508.pdf>. Acesso em: 21. Nov. 2022.

BAZZAZ, F. A. **Plants in changing environments.** Cambridge, Cambridge University Press. 1996.

BRIFA, J.; SINAGRA, E.; BLUNDELL, R. **Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans.** Heliyon, v.6, n.9, e04691, Sept. 2020.

BRITO, G. F. S.; *et al.* **O Impacto do Material Particulado na Qualidade do Ar.** Rev. Virtual Quim., v. 10, n. 5, p. 1335-1354, 2018.

BEZERRA, L. D. A., CALLADO, C. H., CUNHA, M. D. **Does an urban environment affect leaf structure of *Eugenia uniflora* L. (Myrtaceae)?**. Acta Botanica Brasilica [online]. 2020, v. 34, n. 2, pp. 266-276.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente, 1990. **Resolução nº 003, 28 de Junho de 1990.** Ministério do Meio Ambiente, 1990.

COOPER, C. D.; ALLEY, F. C. **Air Pollution Control: A Design Approach.** Waveland Press, 2011. 839 p.

CALLEGARI, R. F. **Fotossíntese C4 e metabolismo ácido das crassuláceas (CAM) em uma mesma folha: elucidando os componentes, a plasticidade e a sinalização por trás de uma rara adaptação fotossintética.** 2021. 217 f. Tese (Doutorado). Curso de Pós-graduação em Ciências. Universidade de São Paulo. 2021.

CHOWDHURY, S.; *et al.* **Insects as bioindicator: A hidden gem for environmental monitoring.** Frontiers in Environmental Science, v. 11. 1146052. 2023.

CRAPNELL, R. D.; CRAIG, E. B. **Electroanalytical overview: The determination of manganese.** Sensors and Actuators Reports, v.4, n.2, 2022.

CHANDRA, V. P.; *et al.* **Braking pad-disc system: Wear mechanisms and formation of wear fragments.** In Wear; Elsevier, v. 322–323, p. 251– 258, 2015.

CASTELHANO, F. J., *et al.* **Réquia. The impact of long-term weather changes on air quality in Brazil.** Atmospheric Environment, v. 283, n. 15, 2022.

CARDOSO-GUSTAVSON, P., et al. (2015). **Tillandsia usneoides: a successful alternative for biomonitoring changes in air quality due to a new highway in São Paulo, Brazil.** Environmental Science and Pollution Research, 23(2), 1779–1788.

CHEN, J.; HOEK, G. **Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta – analysis.** Environ Int. 2020 Oct;143:105974.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Emissões veiculares no estado de São Paulo 2020** [recurso eletrônico] / CETESB ; Coordenação técnica Marcelo Pereira Bales ; Elaboração Antônio de Castro Bruni... [et al.]. – São Paulo : CETESB, 2022. 222p.

CRT – CONCESSIONÁRIA RIO TERESÓPOLIS. **BR-116 tem intervenção na rua lateral em vila maria helena, sentido rio de janeiro, para construção de acesso à posto de gasolina.** Disponível em: [https://www.crt.com.br/conteudo\\_view.asp?id=9998&secao=Trafego&IDpai=38](https://www.crt.com.br/conteudo_view.asp?id=9998&secao=Trafego&IDpai=38). Acesso em: 30. Nov. 2021.

DRUMMOND, L. O. **Padrões de concentração de mercúrio em tecidos de anfíbios de um ecossistema montano tropical do estado do Rio de Janeiro, sudeste do Brasil.** Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2017.199 pp.

ELIAS, C.; *et al.* **Native bromeliads as biomonitors of airborne chemical elements in a Brazilian restinga forest.** J. Radioanal. Nucl. Chem. 278, 423-427. 2008.

EEA – EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY. **Air quality in Europe 2021: Health impacts of air pollution in Europe,** 2021. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2021/health-impacts-of-air-pollution> Acesso em: 08. Nov. 2022.

EEA - EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY. **Transport and environment report 2022. Digitalisation in the mobility system: challenges and opportunities.** 2022.

EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle.** Disponível em: <https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle> Acesso em: 10. Nov. 2022.

ELIAS, L.; AOYAMA, E. **Anatomia foliar e histoquímica de Tillandsia usneoides (L.) L. (Bromeliaceae).** Enciclopedia biosfera, v. 16, n. 29, 2019.

FOCARELLI, F.; GIACHINO, A.; WALDRON, K. J. **Copper microenvironments in the human body define patterns of copper adaptation in pathogenic bacteria.** Plos Pathog, v. 18, n. 7, e1010617, July, 2022.

FERNANDÉZ-PACHECO, V. M.; et al. **Physical and CFD model used in the analysis of particles dispersion.** Heliyon, v. 9, n. 11, 2023.



FUEL ECONOMY. **Reduce Climate Change.** Disponível em: <https://www.fueleconomy.gov/feg/climate.shtml#:~:text=Highway%20vehicles%20release%20about%201.4,year%20for%20a%20typical%20vehicle>. Acesso em: 10. Nov. 2022.

FERNÁNDEZ-PACHECO, V.M.; *et al.* **CFD model to study PM10 dispersion in large-scale open spaces.** *Sci Rep*, 13, 5966 (2023).

GIECHASKIEL, B.; *et al.* **A review of measurement and results of the European project PMP on particle number and particle mass emissions of vehicles.** *Aerosol Science and Technology*, 48(8), 1-42. 2014.

GRANTZ, D. A.; *et al.* **Ecological effects of particulate matter.** *Environment International*, v. 29, n. 2 -3, p. 213-239. 2003.

HA, S. **Air pollution and neurological development in children.** *Developmental Medicine & Child Neurology*, v. 63, n. 4, 359-488. 2021.

HAGINO, H.; *et al.* **Laboratory testing of airborne brake wear particle emissions using a dynamometer system under urban city driving cycles.** In *Atmos. Environ.*; Elsevier Ltd, v. 131, pp 269– 278. 2016.

HULSKOTTE, J.; *et al.* **Elemental composition of current automotive braking materials and derived air emission factors.** In *Atmos. Environ.*; Elsevier Ltd, v. 99, p 436– 445, 2014.

Hoekman, S. K.; Broch, A. **MMT effects on gasoline vehicles: A literature review.** *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, v. 9, n. 1, p. 322 – 342, 2016.

IPPC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Synthesis report of the ipcc sixth assessment report (AR6)** (2023). Disponível em: [https://report.ipcc.ch/ar6syrr/pdf/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_LongerReport.pdf](https://report.ipcc.ch/ar6syrr/pdf/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf). Acesso em: 20. Dez. 2023.

KIOUMOURTZOGLOU, M. A.; *et al.* **Long-term PM2.5 Exposure and Neurological Hospital Admissions in the Northeastern United States.** *Environ Health Perspect*, v. 124, n. 1, p. 9 – 23, 2016.

KUKUTSCHOVÁ, J.; *et al.* **On airborne nano/micro-sized wear particles released from low-metallic automotive brakes.** In *Environ. Pollut.*; Elsevier, v. 159, p 998– 1006, 2011.

KOLLANUS, V.; *et al.* **Mortality due to Vegetation Fire-Originated PM2.5 Exposure in Europe-Assessment for the Years 2005 and 2008.** *Environ Health Perspect*, v. 125, n.1, p. 30-37, 2017.

LAUMBACH R, MENG Q, KIPEN H. **What can individuals do to reduce personal health risks from air pollution?** J Thorac Dis, v. 7, n.1, p. 96-107, 2015.

LAWRENCE, S.; *et al.* **Quantification of vehicle fleet PM10 particulate matter emission factors from exhaust and non-exhaust sources using tunnel measurement techniques**, Environmental Pollution, v. 210, p. 419-428, 2016.

LIANG, L.; *et al.* **The Effect of COVID-19 on Youth Mental Health**. The Psychiatric quarterly, v. 91, n. 3, 2020.

LI, K.; *et al.* **Efficient improvement for dissociation behavior and thermal decomposition of manganese ore by microwave calcination**. Journal of Cleaner Production, v. 260, n. 1, 2020.

LINO, A. S.; *et al.* **Metal bioaccumulation in consumed marine bivalves in Southeast Brazilian coast**. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, v. 34, p. 50-55, 2016.

LIMA, C. V. S.; MEURER, E. J. **Elementos-traço no solo, nas águas e nas plantas de uma lavoura de arroz irrigado do rio grande do sul**. REA – Revista de estudos ambientais (Online), v.15, n. 1, p. 20-30, jan./jul. 2013.

MAHER B.A.; *et al.* **Magnetite pollution nanoparticles in the human brain**. Proc. Natl. Acad. Sci. Unit. States Am. 2016;113 (39):10797–10801.

MALUNGUJA, G.K., THAKUR, B., DEVI, A. **Heavy Metal Contamination of Forest Soils by Vehicular Emissions: Ecological Risks and Effects on Tree Productivity**. Environ. Process. 9, 11 (2022).

MEHANA, E. *et al.* **Biomonitoring of Heavy Metal Pollution Using Acanthocephalans Parasite in Ecosystem: An Updated Overview**. Animals, v.10, n. 5: 811, April, 2020.

MAHAN, K. L.; ESCOTT-STUMP, S.; RAYMOND, J. L. **Krause : alimentos, nutrição e dietoterapia**. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier, 2012.

MOCERINO, L.; *et al.* **A methodology for the design of an effective air quality monitoring network in port areas**. Scientific Reports, v. 10, 2020.

NIECHAYEV N. A.; *et al.* **Understanding trait diversity associated with crassulacean acid metabolism (CAM)**. Curr Opin Plant Biol, v. 49, p. 74-85. 2019.

OMS – ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE. **Novas Diretrizes Globais de Qualidade do Ar da OMS visam salvar milhões de vidas da poluição do ar: A poluição do ar é uma das maiores ameaças ambientais à saúde humana, juntamente com as mudanças climáticas**. Disponível em: <https://www.who.int/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution> Acesso em: 08. Nov. 2022.

OMS – ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE. **Air quality and health.** <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/health-impacts>. Acesso em 01. Dez.2022.

OMS – ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE. **Health Risks of Particulate Matter from Long-range Transboundary Air Pollution.** European Centre for Environment and Health, Bonn, Germany (2006). Disponível em: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/107691/E88189.pdf?sequence=1>. Acesso em: 14. Nov. 2023.

OPAS - ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE. **Novos dados da OMS revelam que bilhões de pessoas ainda respiram ar insalubre: Mais de 6 mil cidades atualmente monitoram a qualidade do ar.** Disponível em: <https://www.paho.org/pt/noticias/4-4-2022-novos-dados-da-oms-revelam-que-bilhoes-pessoas-ainda-respiram-ar-insalubre> Acesso em: 08. Nov. 2022.

PARRA, E. A. E.; *et al.* **Revisión | Review The Tillandsia genus: history, uses, chemistry, and biological activity [El género Tillandsia: historia, usos, química y actividad biológica].** Boletín latinoamericano e do caribe de plantas medicinais e aromáticas, v. 18, n. 3, p. 239 – 264, 2019.

PIRACELLI, V. P.; et al. **Emissões de poluentes atmosféricos em condições reais de pavimentação asfáltica: material particulado, black carbon e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos.** Quím. Nova, v. 43, n.4, 2020.

PIZZATO, E.; SANTOS, D. N. D. **Aspectos geológicos e emergências químicas em grandes rodovias: o caso da BR-116, trecho da Cidade de Guarulhos (SP) Brazil.** Revista Espacios, v. 39, n. 51, 2018.

PUJATTI, F. J. P. **Desenvolvimento de um sistema de gerenciamento eletrônico para motores de ignição por centelha.** 2007. 221 f. Tese (Doutorado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo horizonte, 2007.

PELLEGRINI, E.; *et al.* **Evaluation of the suitability of Tillandsia usneoides (L.) L. as biomonitor of airborne elements in an urban area of Italy, Mediterranean basin.** Atmos. Pollut. Res. 5, 226-235. 2014.

RAFFA, C.M.; CHIAMPO F.; SHANTHAKUMAR, S. **Remediation of Metal/Metalloid-Polluted Soils: A Short Review.** Applied Sciences, v.11, n. 9 :4134, April, 2021.

RAGGI, F. A. S. **Uso de *oeceoclades maculata (lindley) lindley* como bioindicadora de metais pesados no ar atmosférico da cidade de volta redonda, RJ.** 2020. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2020.

RIBEIRO, T. D. A. G. **O potencial da divulgação científica pelo modelo dialógico de engajamento público no Parque Nacional da Serra dos Órgãos.** 2020, 154 f. Dissertação

(Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Divulgação da Ciência, Tecnologia e Saúde, Fundação Oswaldo, Casa de Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro. 2020.

RAVISH, R.; SWAMY, S. **Intelligent Traffic Management: A Review of Challenges, Solutions, and Future Perspectives**. Transport and Telecommunication Journal, v. 22, p. 163-182, 2021.

SANTOS, M. J.; *et al.* Material Particulado na atmosfera urbana e suas interações com a saúde humana. Editora Alta Performance, 1º ed [E-book], Goiânia, 2022. 170p.

SASSYKOVA, L. R.; *et al.* **The Main Components of Vehicle Exhaust Gases and Their Effective Catalytic Neutralization**. Oriental Journal Of Chemistry, v. 35, n.1, p. 110-127, 2019.

SANTOS, U. D. P.; *et al.* **Poluição do ar: efeitos respiratórios**. Jornal Brasileiro de Pneumologia, v. 47, n. 01, p. 1-13, 2021.

SILVA, N. P. P. **Revisão e atualização dos parâmetros para classificação dos tricomas em croton l. (euphorbiaceae)**. 2021. 93 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Ciências Biológicas – Botânica Tropical, Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2021.

SILVA, V. A.; *et al.* **Urban Pollutant Dispersion on a Turbulent Fluid Model**. Trends in Computational and Applied Mathematics, v. 24, n. 4 (2023), 617-633.

VERMA, A., Singh, S. N. **Alterações bioquímicas e ultraestruturais na folhagem das plantas expostas à autopoluição**. Environ Monit Assessment 120 , 585–602 (2006).

WANNAZ, E.; PIGNATA, M. 2006. **Calibration of four species of Tillandsia as air pollution biomonitors**. J. Atmos. Chem. 53, 185-209.

VELASCO, E.; *et al.* **Intensive field campaigns as a means for improving scientific knowledge to address urban air pollution**, Atmospheric Environment, v. 246, 118094, 2021.

WESSELS, I.; RINK, L. **Micronutrients in autoimmune diseases: possible therapeutic benefits of zinc and vitamin D**. The Journal of Nutritional Biochemistry, v. 77:108240, 2020.

WEN, Y.; *et al.* **Quantitatively Disentangling the Geographical Impacts of Topography on PM2.5 Pollution in China**. Remote Sensing. 2022, 14 (24), 6309.

WU, X.; *et al.* **Exposure to air pollution and COVID-19 mortality in the United States: A nationwide cross-sectional study**. medRxiv [Preprint], v. 4, 6 (45), 2020.

XAVIER, L. D. P. **Variação morfoanatômica e histoquímica em escamas de espécies de Tillandsia L. (Bromeliaceae) com relação ao gradiente de precipitação**. 2020. 59 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Biologia Vegetal, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

XINGYUE, S.; et al. **Biomarker Responses of Spanish Moss *Tillandsia usneoides* to Atmospheric Hg and Hormesis in This Species.** *Frontiers in Plant Science.*, v. 12. 10.3389. 2021.

ZHANG, J.; et al. **Vehicular non-exhaust particulate emissions in Chinese megacities: Source profiles, real-world emission factors, and inventories,** *Environmental Pollution*, v. 266, n 2, 2020.

ZHOU, X.; *et al.* **Excess of COVID-19 cases and deaths due to fine particulate matter exposure during the 2020 wildfires in the United States.** *Ciência*, v. 7, 2021.